

Konzepterarbeitung für eine solarunterstützte Wärmepumpe

Diplomarbeit
von
Josef Plössnig

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften



Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Heinz

Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Heimrath

Beurteiler:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René Rieberer

Graz, im März 2012

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Kurzfassung

Am Markt der Heizungstechnik hat sich in den letzten Jahren ein Trend hin zu zur Kombination von thermischen Solaranlagen und Wärmepumpen gezeigt. Ziel dieser Arbeit war es mit Komponenten eines Herstellers ein Systemkonzept zu entwickeln das einen interagierenden Betrieb zwischen Solaranlage und Wärmepumpe ermöglicht. Eines der Hauptkriterien war, dass sowohl bei der Wärmepumpe sowie bei den Solarkollektoren keine konstruktive Veränderung notwendig sein sollte.

Bei dieser Kombination wird versucht durch Anheben der Wärmepumpenquelltemperatur mit Hilfe solarer Wärme und gleichzeitigem Senken der Kollektorbetriebstemperatur, günstigere und somit effizientere Betriebspunkte bei beiden Anlagen zu erzeugen. Um einen Überblick möglicher Systeme zu bekommen wurde eine Marktanalyse durchgeführt. Dabei wurden viele Systemanbieter gefunden, die sehr unterschiedliche Systemlösungen anbieten. Es konnte kein Trend hin zu einer bestimmten Systemkombination erkannt werden. Auf Grundlage verschiedener wissenschaftlicher Berichte und Studien wurde eine Klassifizierung der Anlagenvarianten erstellt. Mit den Ergebnissen dieser Untersuchung ist ein System ausgewählt worden, das mit Hilfe des Simulationstools Polysun von Vela Solaris einer Jahressimulation unterzogen wurde.

Grundlage der Simulation war die Auswahl geeigneter Komponenten sowie die Erstellung einer Systemkonfiguration, die eine Verbesserung der Anlageneffizienz im Vergleich zu einer Anlage ohne Interaktion zwischen Solaranlage und Wärmepumpe erreicht. Die Hauptkomponenten dieser Anlage sind eine Sole-Wasser Wärmepumpe und ein Kollektorfeld mit 12 m² Absorberfläche. Als Schnittstelle zwischen dem Solarkreislauf und der Wärmepumpequelle in der kombinierten Variante wird ein Pufferspeicher eingesetzt. Dieser wird mit solarer Wärme beladen und kann als Quelle für die Wärmepumpe dienen. Zusätzlich wurde eine Anlagenvariante simuliert, die nur mit einer Wärmepumpe den Wärmebedarf des definierten Gebäudes decken muss. Für alle Anlagenvarianten sind die gleichen Randbedingungen hinsichtlich Wärmebedarf und Erdsondenauslegung definiert worden.

Die –Hw. stark vereinfachte- Untersuchung ergab, dass bei einer Kombination mit Interaktion nur geringfügige Verbesserungen der Anlageneffizienz mit den vorhandenen Komponenten möglich sind. Die Jahresarbeitszahl konnte von der Anlagenvariante ohne Interaktion hin zur Anlagenvariante mit Interaktion zwischen Solaranlage und Wärmepumpe um 3,5 % gesteigert werden. Der Jahresverbrauch an elektrischer Energie konnte um 4 % gesenkt werden. Durch die Installation einer Solaranlage konnte der Jahresenergieverbrauch gegenüber der Anlage nur mit Wärmepumpe um 34 % gesenkt werden.

Eine wirtschaftliche Untersuchung der drei Anlagenvarianten, die die Energiekosten und die Kapitalkosten berücksichtigt, ergab, dass bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren bei den Anlagenvarianten mit Solaranlage trotz Energieeinsparung aufgrund der höheren Investitionskosten auch höhere jährliche Kosten entstehen. Die zusätzlichen Kosten, die für

die Realisierung der interagierenden Anlagenvariante notwendig sind, machen diese Anlagenvariante zur teuersten.

Allgemein kann man erkennen, dass ungünstige Bedingungen für beide Anlagen der interagierenden Variante zu Gute kommen. Allerdings ist bei einer korrekten Auslegung der Anlagen, wie sie bei dieser Arbeit vorgenommen wurde, kein signifikanter Vorteil einer kombinierten Variante zu erkennen. Großen Anteil am Verbesserungspotential einer solchen Anlage hat die Regelung. Im optimalen Fall kann sie erkennen, wann aufgrund des Wirkungsgrades der Solarkollektoren und der Leistungszahl der Wärmepumpe, die solare Wärme direkt in den Speicher eingebracht werden kann. Die Simulation einer solchen Regelung war mit Polysun nicht möglich.

Abstract

On the heating market a trend towards the combination of solar thermal systems and heat pumps has shown in recent years. The aim of this study was to develop a system concept built by components of a manufacturer, that enables an interacting operation between solar and heat pump. One of the main criteria was that both, no constructive change should be necessary neither for the heat pump nor for the solar panels

The aim of this combination is increasing the temperature of the heatpump-source by using solar heat and simultaneously lowering the operating temperature of the solar collectors. Thereby both systems work at more efficient operating points. To get an overview of practicable systems, a market analysis was conducted. As a result many system vendors have been found which offer very different system solutions. No trend could be seen toward a particular system combination. Based on several scientific reports and studies, a classification of system solutions has been created. Based on the results of this investigation, a system was selected, which was reviewed by an annual simulation with the help of the simulation tool *Polysun* by *Vela Solaris*.

Basis of the simulation was the selection of suitable components, and the creation of a system configuration, with an improved efficiency, compared to a system without interaction between the solar and heat pump. The main components of this system are a brine-/water heat pump and a collector field with 12 m² absorber surface. As an interface between the solar cycle and the heat pump source cycle in the combined variant, a buffer storage is used. This is loaded with solar heat, and can serve as a source for the heat pump. In addition, a system was simulated, which must meet for a combination of heat pump and solar with interaction the heating requirements of the defined building. For all asset types, the same boundary conditions with respect to heat requirements and geothermal probe dimensioning have been defined.

The investigation revealed that hardly any improvements in plant efficiency with constructive invariable components are possible. The seasonal performance factor of the system type with interaction between the solar and heat pump can be increased by 3.5 % compared to the system type without interaction. The annual consumption of electrical energy could be reduced by 4 %. By installing a solar system the annual energy consumption was reduced by 34 %.

An economic analysis of the three system types taking into account the energy costs and the cost of capital revealed that by a useful life of 20 years the system type with solar energy, despite the energy savings, due to higher investment costs results into higher annual costs compared to the system type without solar collectors. The additional costs that are necessary for the realization of the interacting system type make this system the most expensive of the three variants.

Generally you can tell that unfavorable conditions for both systems (solar heat and heat pump) make the interacting system type more competitive. However, for a correct dimensioning of the plants, as was done in this study, no significant benefit of a combined system type could be found. Large room for improvement potential of such a combined system has the control. In the optimal case, it can recognize when the solar heat is to be inserted directly into the buffer storage due to the efficiency of solar collectors and the COP of the heat pump. The simulation of a scheme with such a control was not possible with Polysun.

Vorwort

Sowohl die Solarthermie als auch Wärmepumpen sind zukunftsorientierte Technologien, mit denen eine regenerative Wärmebedarfsdeckung von Gebäuden möglich ist, und bieten Immobilienbesitzern eine interessante Alternative zur weit verbreiteten Wärmebereitstellung mit fossilen Brennstoffen. In dieser Arbeit wurden beide Systeme betrachtet und eine Möglichkeit untersucht, wie durch eine Kombination dieser Systeme die Effizienz der Heizungsanlage gesteigert werden kann.

Die Diplomarbeit bot mir als Maschinenbaustudent mit dem Studienschwerpunkt Energie- und Umwelttechnik die Möglichkeit, interessante Einblicke in die Entwicklung von Heizungssystemen zu gewinnen. Vor allem aus der wirtschaftlichen Untersuchung verschiedener Anlagenkonfigurationen konnte ich erkenntnisreiche Erfahrungen zur Wettbewerbsfähigkeit von regenerativen Heizungsanlagen sammeln.

Mit Hilfe der freundschaftliche Betreuung durch Herrn Andreas Heinz und Herrn Richard Heimrath, die beide Mitarbeiter des Instituts für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz sind, konnte ich aus den gewonnenen Erkenntnissen eine wissenschaftliche Arbeit verfassen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung.....	1
1.2	Sonne als Energiequelle	2
1.3	Die Energie der Sonne	3
1.4	Globalstrahlung	4
2	Funktionsweise einer solarthermische Anlage	7
2.1.1	Kollektor / Absorber.....	7
2.1.2	Speicher.....	8
2.1.3	Solarflüssigkeit.....	8
2.2	Kennzahlen einer solarthermischen Anlage	9
2.2.1	Solarer Deckungsgrad.....	9
2.2.2	Systemnutzungsgrad.....	10
2.3	Solares Angebot und Bedarf	12
2.3.1	Energiebilanz eines Flachkollektors	12
2.4	Bauformen thermischer Solarkollektoren.....	16
2.4.1	Unverglaste Kollektoren / Absorber	16
2.4.2	Flachkollektoren.....	18
2.4.3	Vakuumkollektoren.....	19
2.4.4	Niederstemperaturkollektoren	22
3	Grundlagen der Wärmepumpentechnik	23
3.1	Der Kältekreislauf zur Erzeugung von Nutzwärme.....	23
3.2	Effizienz der Wärmepumpe	26
3.3	Wärmequellen für Wärmepumpe.....	28
3.3.1	Außenluft.....	28
3.3.2	Erdreich.....	29
3.3.3	Grundwasser.....	34
4	Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe	35
4.1	Vorteile seitens der Solarthermie.....	36
4.1.1	Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades	36
4.1.2	Vermeidung von Stagnation	36
4.1.3	Erhöhter Kollektorertrag durch längere Betriebszeiten	37
4.2	Vorteile seitens der Wärmepumpe	38

4.2.1	Verbesserung des COPs.....	38
4.2.2	Verzicht auf großflächige Erdwärmetauscher	38
4.2.3	Aktive oder passive Regeneration	39
4.3	Auftretende Probleme	39
4.3.1	Unterschiedliche Betriebspunkte	39
4.3.2	Erhöhter Regelungsaufwand	40
4.4	Gliederung/Klassifizierung von Systemkombinationen	41
4.4.1	Parallele Systeme	41
4.4.2	Serielle Systeme	43
4.4.3	Kombinierte Systeme	44
4.5	Forschungsberichte und Studienarbeiten	49
4.5.1	Theoretische Chancen der Effizienzverbesserung	49
4.5.2	System mit Niedertemperaturspeicher	53
4.5.3	Erdreich Regeneration	55
4.5.4	Kombination von Solaranlage mit Luft- Wärmepumpe.....	60
5	Vorbereitung der Simulation.....	65
5.1	Randbedingungen/ Gebäude	65
5.2	Vorstellung der drei Anlagenvarianten.....	65
5.2.1	Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“	65
5.2.2	Anlagenvariante „Wolf“	66
5.2.3	Anlagenvariante „Kombination“	66
5.3	Auswahl eines Simulationstools	67
5.4	Komponenten und Kennwerte	69
5.4.1	Speicher	69
5.4.2	Wärmepumpe.....	75
5.4.3	Kollektor TopSon F3-1	76
5.4.4	Erdsonde.....	78
5.4.5	Komponenten Pumpen.....	78
6	Simulation mit Polysun	80
6.1	Vordefinierte Vorlagen als Ausgangssituation	80
6.2	Definition der simulationstechnischen Randbedingungen.....	81
6.2.1	Standort	82
6.2.2	Gebäude	82

6.2.3	Warmwasser	83
6.3	Die Anlagen im Überblick	84
6.3.1	Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“	85
6.3.2	Anlagenvariante „Wolf“	86
6.3.3	Anlagenvariante „Kombination“	88
6.4	Regelstrategie in Polysun.....	89
6.4.1	Vorlage mit ähnlichen Anforderung an die Regelung.....	90
6.5	Regelung der simulierten Systeme.....	92
6.5.1	Warmwasserkreislauf	92
6.5.2	Heizkreislauf	92
6.5.3	Wärmeerzeugerkreislauf	92
6.5.4	Solekreislauf	93
6.5.5	Solarkreislauf	93
7	Energetische Auswertung des Systems	96
7.1	Energetische Bilanz der Anlagenvarianten	97
7.2	Elektrischer Energieverbrauch der Anlagenvarianten	101
7.3	Energetische Bilanzierung der Speicher	102
7.3.1	Energetische Bilanz Trinkwasserspeicher SEW-1-300.....	102
7.3.2	Energetische Bilanz über Pufferspeicher BSP-W-SL-1000.....	103
7.4	Auswertung der Wärmepumpe	105
7.5	Auswertung solarthermische Energie an das System.....	107
7.6	Energetische Betrachtung der Erdsonde	108
7.7	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	109
8	Wirtschaftliche Analyse	111
8.1	Annuitätenmethode	111
8.1.1	Kapitalkosten.....	111
8.1.2	Energiekosten	114
8.2	Jährliche Kosten der Anlagenvarianten	115
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	117
9.1	Vorteile der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe	117
9.2	Marktanalyse.....	118
9.3	Anlagenvarianten und Ergebnisse der Simulation	118
9.4	Ausblick.....	120

Literaturverzeichnis	121
Abbildungsverzeichnis	124
Tabellenverzeichnis	128
Anhang.....	130

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

In den letzten Jahren sind viele, teilweise sehr unterschiedliche Systeme am Markt erschienen, die eine solare Unterstützung der Wärmepumpen-Quelle ermöglichen. Die vorliegende Arbeit sollte diese neue Entwicklung der Solarthermie- und Wärmepumpentechnologie hinsichtlich der davon zu erwartenden Effizienzsteigerung untersuchen.

Einleitend sollte ein Überblick über den Markt der Solar/Wärmepumpensysteme geschaffen werden, um daraus die Vorteile sowie Nachteile verschiedener Kombinationsvarianten aufzuzeigen. Einerseits sind die zu erwartende Effizienzsteigerung durch verschiedene Systeme auf Grundlage von Berichten abzuschätzen. Andererseits sollte auf mögliche technische Konflikte aufmerksam gemacht werden, wie z.B. Kondenswasserbildung im Kollektor, die bei sehr niedrigen Absorbertemperaturen auftritt und die Dämmung zerstört und damit den Kollektor unbrauchbar macht. Auf Grundlage dieser Analyse, soll entschieden werden, welcher Systemtyp näher untersucht wird.

Der Aufbau des aus dem vorigen Schritt ausgewählten Systemtyps, soll mit Komponenten erfolgen die ohne konstruktive Veränderungen für den interagierenden Betrieb tauglich sind. Lediglich durch eine komplexere hydraulische Verschaltung und die Steuerung soll der interagierende Betrieb ermöglicht werden.

Unter Einhaltung dieser Anforderungen soll ein energieeffizientes System mit Hilfe eines geeigneten Simulationstools gesucht werden.

1.2 Sonne als Energiequelle

Es gibt drei Primärquellen von erneuerbarer Energie (Abbildung 1-1). Diese sind die Erde, die Planeten und die Sonne. Die wesentlichen Formen erneuerbaren Energien lassen sich auf die Sonnenenergie zurückführen. Die Energie aus Erdwärme und Planetenbewegung hat immer nur eine untergeordnete Rolle.

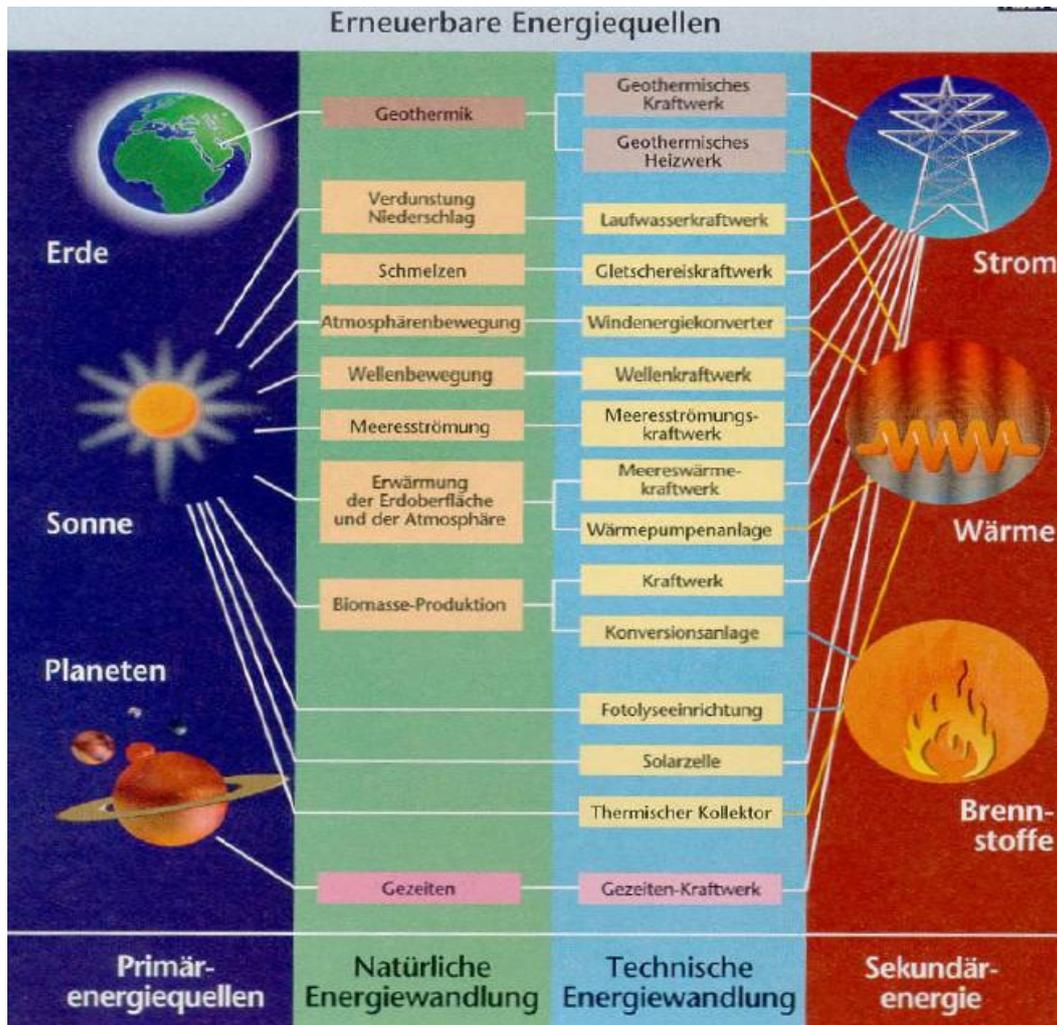


Abbildung 1-1 Einsatz erneuerbarer Energien (Bundesministerium für Wirtschaft, 1993)

In dieser Arbeit sollen Solarthermische Anlagen und Wärmepumpen miteinander kombiniert werden, so dass sie sich gegenseitig unterstützen. Obwohl mit Ausnahme der Luftwärmepumpe Wärmepumpen Erdwärme als Energiequelle verwenden, ist auch hier die Sonne die primäre Energiequelle. Die Sonne ist dafür verantwortlich, dass die äußere Erdhülle erwärmt und so immer wieder regeneriert wird.

Solarthermische Kollektoren benötigen offensichtlich die Sonne als Energiequelle. Sie wandeln direkt die Energie der Sonnenstrahlung in Wärme um. In den nächsten Abschnitten soll daher die Sonne als Energieträger näher betrachtet werden.

1.3 Die Energie der Sonne

Der immer größer werdende Treibhausgasausstoß und das zugleich absehbare Versiegen der fossilen Energieträger zwingt die Menschheit dazu, regenerative Energiequellen zu erschließen. Die Sonne ist die Quelle allen Lebens. Ohne sie würde keine der regenerativen Energiequellen wie z.B. Wasserkraft oder Biomasse zur Verfügung stehen.

Die Lebensdauer der Sonne wird auf weitere 5 Milliarden Jahre geschätzt, und steht somit der Menschheit unbegrenzt zur Verfügung (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008). Allein eine 4-stündige Einstrahlung auf die Landflächen der Erdkugel würde den gesamten Jahresenergiebedarf der Weltbevölkerung decken.

Die Abbildung 1-1 zeigt, dass sich zwischen dem Jahr 1990 und 2010 der Primärenergiebedarf in Deutschland nur geringfügig reduziert hat. Die erneuerbaren Energien hatten aber den größten prozentualen Zuwachs. Dieser Trend wird weiter durch das EEWärmeG (Erneuerbare Energien Wärmegesetz) forciert, welches eine Erhöhung des Anteils der Erneuerbaren Energien zur Wärmeerzeugung auf 14 % bis 2020 vorsieht.

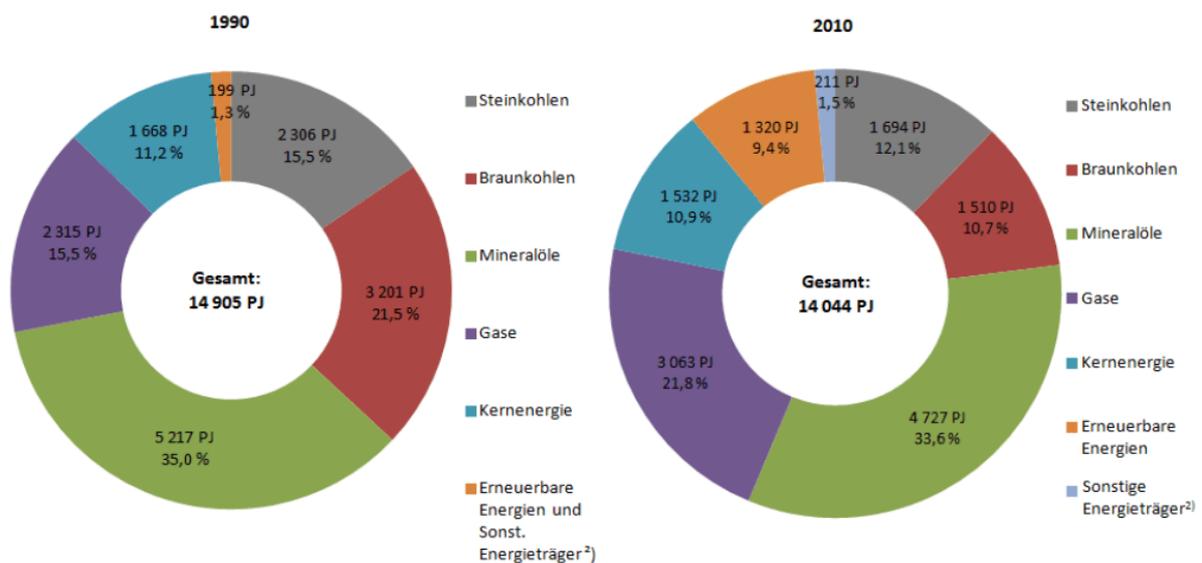


Abbildung 1-2 Entwicklung des Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern¹ (Umweltbundesamt Deutschland)

In den letzten Jahren entbrannte die Diskussion über die globale Klimaerwärmung und steigende Rohstoffpreise, was zu einem langsamen Umdenken führt. Die Entwicklung hin zu mehr umweltfreundlicher Energie ist aber ein sehr langsamer Prozess.

Die Gründe dafür sind vielfältig. Ein großes Problem ist die Grundlastdeckung der Stromerzeugung die in vielen Ländern durch atomare Technologien bewerkstelligt wird. Aber auch die Zukunft der Automobilindustrie kann bis jetzt noch nicht abgeschätzt werden, da

¹ Berechnung auf der Basis des Wirkungsgradgesetzes

sich keine zum Verbrennungsmotor konkurrenzfähigen Antriebssysteme am Markt befinden. Die hohen Kosten der alternativen Energiesysteme verursachen sowohl im industriellen Bereich wie auch im privaten Bereich lange Amortisationszeiten und hemmen die Modernisierung von Gebäuden.

Vor allem im privatwirtschaftlichen Bereich wird sich erst durch steigende Rohstoffpreise von fossilen Brennstoffen ein größerer Anteil von regenerativen Energien durchsetzen, obwohl die technischen Lösungen schon vorhanden sind.

Bei der Nutzung der Sonnenenergie stehen, insbesondere im privaten Bereich, zwei Nutzungsformen zur Verfügung: Mit Hilfe der Photovoltaik kann Sonnenenergie in elektrischen Strom und durch Solarthermieanlagen in Wärme umgewandelt werden. Bei beiden Varianten ist für eine wirtschaftliche Auslegung der Anlagen vertieftes Fachwissen über das Energieangebot der Sonne von entscheidender Bedeutung, da hiervon die mögliche, erreichbare Leistung der Anlagen abhängt.

Für diese Arbeit spielen die Photovoltaik und einige Nutzungsformen der Solarthermie, besonders solche für die Prozesstechnik und Großanlagen, keine oder nur eine untergeordnete Rolle und werden daher nicht weiter erläutert. Die Grundlagen der Sonneneinstrahlung gelten aber für alle gleichermaßen.

1.4 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung ist entscheidend für die technische Nutzung der Sonnenenergie und ist definiert mit der Summe der Strahlung, welche auf eine zur Sonne senkrecht ausgerichtete 1 m^2 große Platte trifft. Die Einheit der Globalstrahlung wird in Watt pro Quadratmeter [W/m^2] angegeben.

Sie setzt sich aus direkter Einstrahlung, die vor allem bei wolkenlosem Himmel genutzt werden kann und der diffusen Strahlung zusammen, welche durch Reflexion und Streuung vor allem bei bewölktem Himmel auftritt.

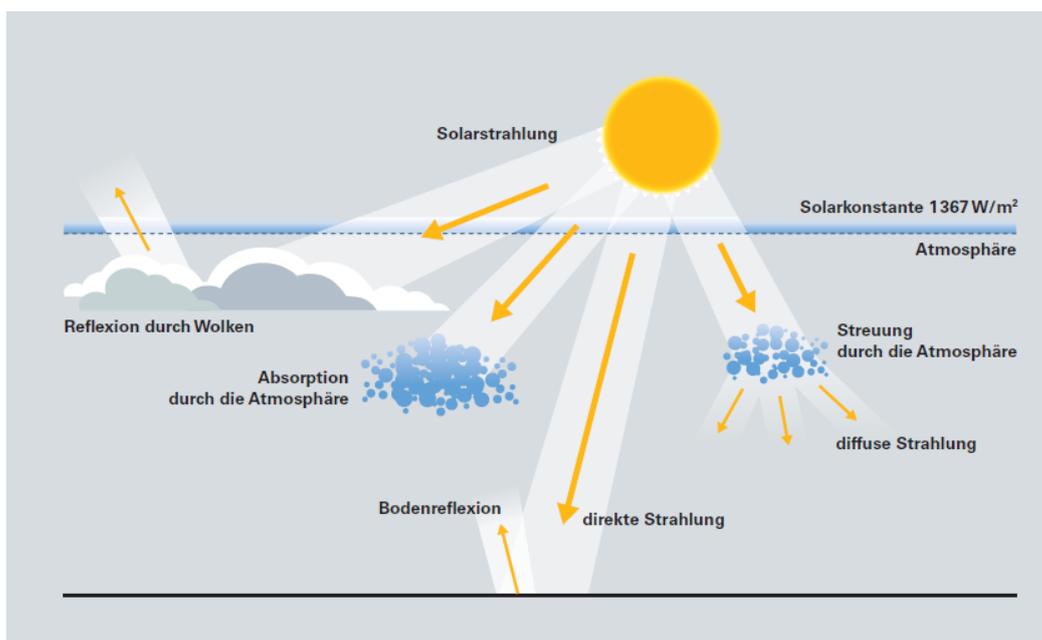


Abbildung 1-3 Strahlungsangebot auf der Erde [(Viessmann GmbH, 2008)]

Die Sonne liefert an den Außenrand der Atmosphäre ein Energieangebot von 1367 W/m^2 , dieses wird als Solarkonstante bezeichnet. Bis zur Erde schwächt diese Energiedichte ab und trifft in Zentraleuropa mit maximal 1000 W/m^2 an der Erdoberfläche auf.

Wie man in Abbildung 1-3 erkennen kann resultiert die Abschwächung aus verschiedenen Einflüssen in der Atmosphäre. Diese sind:

- Atmosphärische Absorption und damit eine Erwärmung der Luft
- Diffuse Streuung durch Gase
- Reflexion an Wolken
- Reflexion an der Erdoberfläche

Die folgende Abbildung zeigt die abnehmende Strahlungsleistung mit zunehmender Bewölkung. Diese ist mit den verstärkten Absorptions- und Reflexionsvorgängen zu erklären.

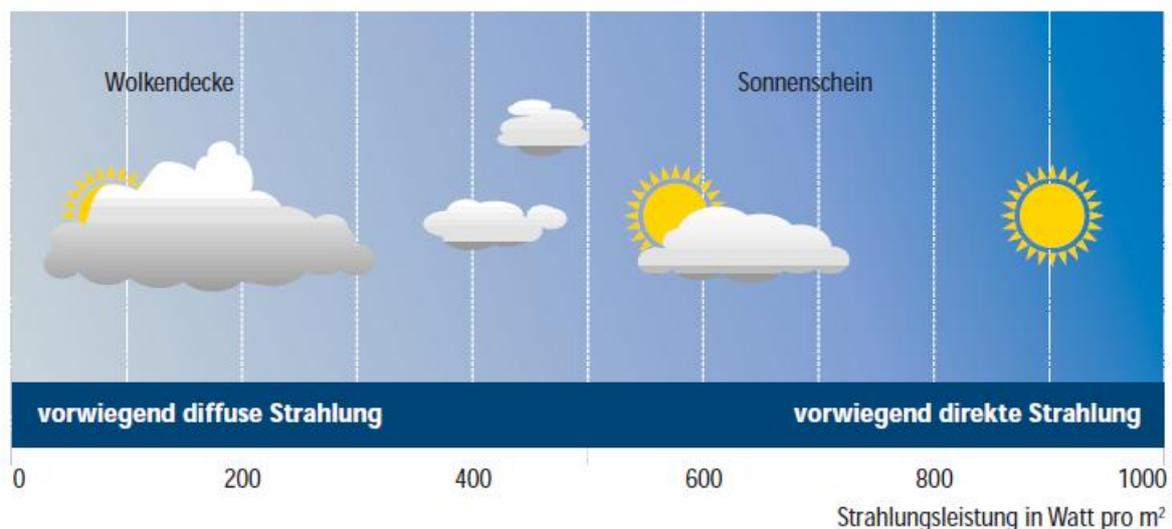


Abbildung 1-4 Globalstrahlung und ihre Komponenten bei unterschiedlichen Himmelszuständen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

Zur Auslegung einer Anlage zur Sonnenenergienutzung sind weniger die Momentanwerte oder das maximale Strahlungsangebot der Sonne interessant. Entscheidend ist die in einem bestimmten Zeitraum auftretende Summe an Globalstrahlung. Durch Anlagenparameter wie die Kollektorfläche, Ausrichtung und Wirkungsgrad kann so der durchschnittlich erzielbare Ertrag ermittelt werden. Abbildung 1-5 zeigt Globalstrahlungskarten für Deutschland und Österreich. Die Globalstrahlung in Deutschland beträgt im Schnitt zwischen 900 und $1200 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Deutscher Wetterdienst) und ist für eine wirtschaftliche Nutzung durchaus ausreichend. Vor allem für die Trinkwassererwärmung und zur Heizungsunterstützung.

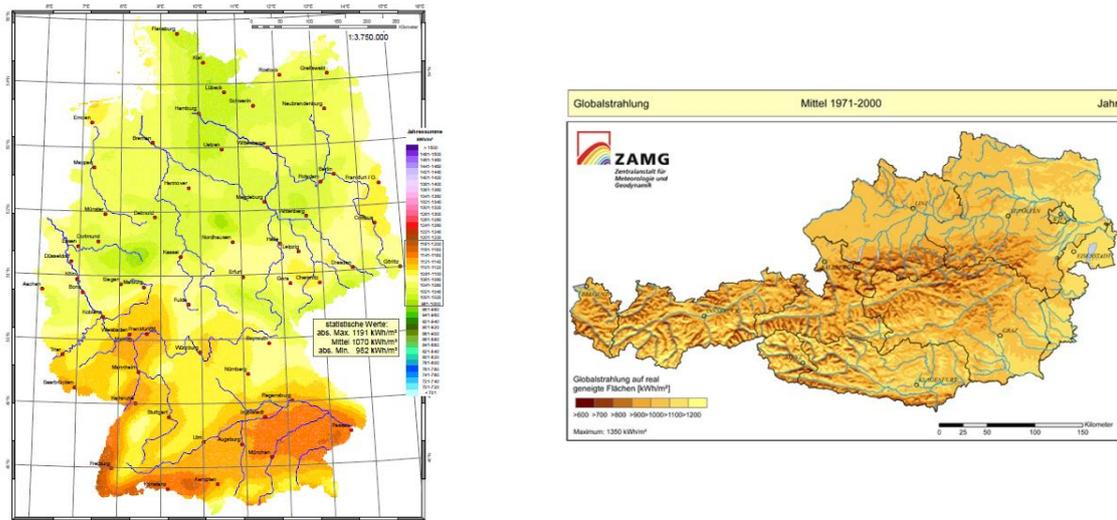


Abbildung 1-5 Globalstrahlungskarten für Deutschland (links) (Deutscher Wetterdienst) und Österreich (rechts) (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik)

Solche Karten sind für alle Flächen in Europa erhältlich. Bezugsquellen sind die Wetterdienste des jeweiligen Landes. Der Deutsche Wetterdienst bietet zum Beispiel alle relevanten Daten zur Berechnung einer Solaranlage für annähernd 50 Euro an (Deutscher Wetterdienst). Auf der Homepage eines von der EU geförderten Instituts (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>) sind vergleichbare Daten auch kostenlos abrufbar. Allerdings sind sie etwas schwieriger auszuwerten.

2 Funktionsweise einer solarthermische Anlage

Der Sonnenkollektor wandelt die Energie der Sonnenstrahlung in Wärme um. Das bedeutet, dass der Kollektor das Bindeglied zwischen der Sonne als Versorger und dem Mensch als Nutzer vom warmen Wasser ist. Ein geschlossener Kreislauf führt die erwärmte Solarflüssigkeit über einen Speicher der dabei erwärmt wird. Der Speicher ist notwendig, da das zeitliche Angebot der Sonne sich in der Regel nicht mit der Nachfrage des Menschen deckt. In der Abbildung 2-1 wird gezeigt wie die Solaranlage in einem Wohnhaus eingegliedert wird.

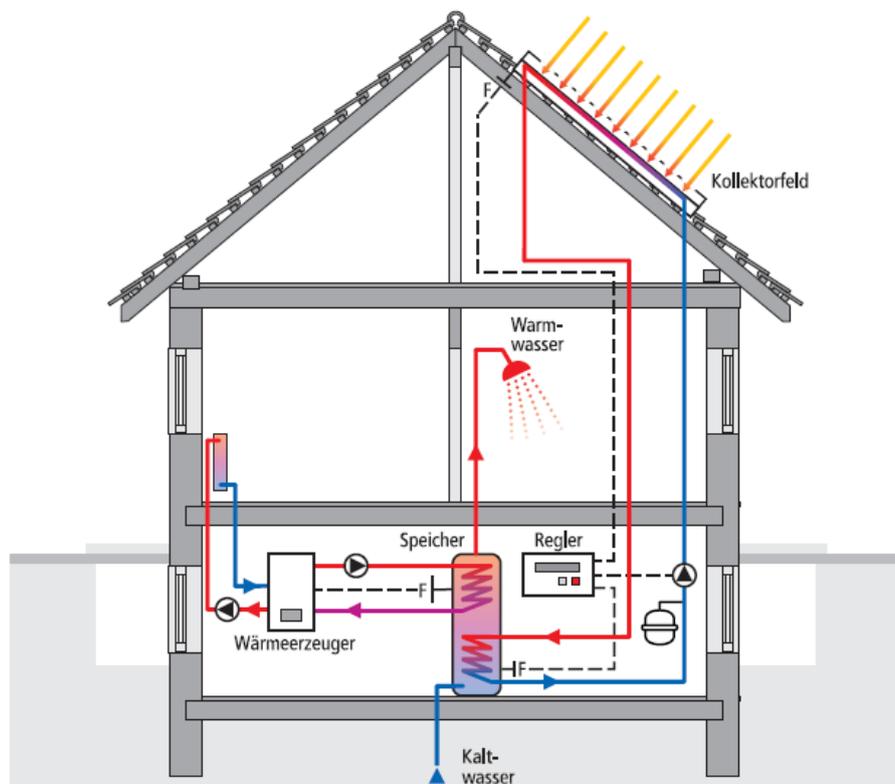


Abbildung 2-1 Standardsolaranlage mit Heizkessel zur Nachheizung (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

2.1.1 Kollektor / Absorber

Der Absorber ist der Hauptbestandteil eines Kollektors, denn er nimmt die Sonnenstrahlung auf. Dabei erhitzt sich seine Oberfläche, und gibt die entstandene Wärme an ein Rohrsystem, in dem sich ein Wärmeträgermedium befindet, weiter. Es ist besonders wichtig, dass eine gute Wärmeübertragung zwischen Absorber und Rohr stattfindet, damit die Wärme des Absorbers rasch abgeführt werden kann. Das Rohrsystem ist über einen Speicher zu einem Kreislauf verschaltet. Im einfachsten Fall gibt ein Wendelwärmetauscher die Wärme an den Speicherinhalt (in der Regel Wasser) ab. Es sei aber erwähnt, dass es

noch weitere Möglichkeiten zur Beladung des Speichers gibt, beispielsweise über einen externen Wärmetauscher.

2.1.2 Speicher

Das durch den Wendelwärmetauscher erwärmte Speichermedium steigt wegen der abnehmenden Dichte bei steigender Temperatur auf. Durch verschiedene Temperaturen im Speicher entsteht eine Schichtung. Das wärmste Medium kann am oberen Rand des Speichers abgezapft werden. Um ein Durchmischen des Speicherinhalts zu vermeiden, sollte das kalte Wasser am Speicherboden möglichst impulsarm eingebracht werden. Beispielsweise mittels eines Prallblechs. Sogenannte Schichtenspeicher beladen und entladen den Speicher direkt in den gewünschten Temperaturschichten.

2.1.3 Solarflüssigkeit

Die Solarflüssigkeit ist verantwortlich dafür, dass die Wärme vom Kollektor in den Speicher gelangt. Sie muss viel Wärme leicht aufnehmen können und gleichzeitig im kalten und warmen Zustand dünnflüssig sein, damit möglichst wenig Druckverlust im Kreislauf erzeugt wird. Daher sollte sie folgende Eigenschaften besitzen.

- eine hohe Wärmekapazität
- eine hohe Wärmeleitfähigkeit und
- eine niedrige Viskosität

Um gegen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt geschützt zu sein ist das Wärmeträgermedium in Mitteleuropa in der Regel eine frostsichere Flüssigkeit. Für Flachkollektoren wird vielfach eine Wasser/Glykol- Mischung wie Tyfocor L verwendet. In den nicht so verbreiteten Vakuumkollektoren wird eine höher thermisch belastbare Wasser/Glykol-Mischung wie Tyfocor LS bzw. Anro LS eingesetzt.

2.2 Kennzahlen einer solarthermischen Anlage

Bei der Auslegung und Dimensionierung bzw. auch zum Vergleich mehrerer Solaranlagen sind bestimmte Kennzahlen erforderlich. Diese sollen in den nächsten Abschnitten erklärt werden.

2.2.1 Solarer Deckungsgrad

Der solare Deckungsgrad kann sowohl für das Gesamtsystem als auch das Heizsystem generell wie folgt definiert werden (Streicher, 2008).

$$SD = \frac{Q_S}{(Q_S + Q_{Nh})} = 1 - \frac{\text{Zusatzheizung abgeg. Wärme}}{\text{Energiebedarf}} = 1 - \frac{Q_{Kessel,ab} + Q_{E-Patronen}}{Q_{Haus} + Q_{BW}} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

mit

SD	[-]	Solarer Deckungsgrad
Q_S	[kWh]	solarer Wärmeertrag
Q_{Nh}	[kWh]	Nachheizungswärmemenge
Q_{BW}	[kWh/a]	jährlich benötigte Energiemenge für Brauchwasser
$Q_{E-Patronen}$	[kWh/a]	jährlich abgegebene Wärmeenergie der E-Patrone
Q_{Haus}	[kWh/a]	jährlich benötigte Wärmeenergie des Hauses
$Q_{Kessel,ab}$	[kWh/a]	jährlich abgegebene Wärmeenergie des Kessels

Bei dieser Betrachtung werden alle Verluste des Speichers der Solaranlage zugerechnet. Wenn der Speicher mehr Verluste hat als Solarenergie eingebracht wird, fallen sogar negative Deckungsgrade an. Diese Betrachtung ist gerechtfertigt, wenn der Speicher nur wegen der Solaranlage eingesetzt wird, und das Heizungssystem einen hohen Wirkungsgrad hat (Streicher, 2008).

Es ist nicht möglich, die Speicherverluste, die aufgrund der Nachheizung entstehen, von denen, die von der Solaranlage verursacht wurden, zu unterscheiden, da sich die Schichtung vom Solarbereich zum Nachheizbereich bewegt und umgekehrt.

Der solare Deckungsgrad kann auch für andere Systemgrenzen definiert werden. Abbildung 2-2 zeigt zum einen eine Betrachtung über die Systemgrenzen und zum anderen eine detailliertere Betrachtung über die Speichergrenzen.

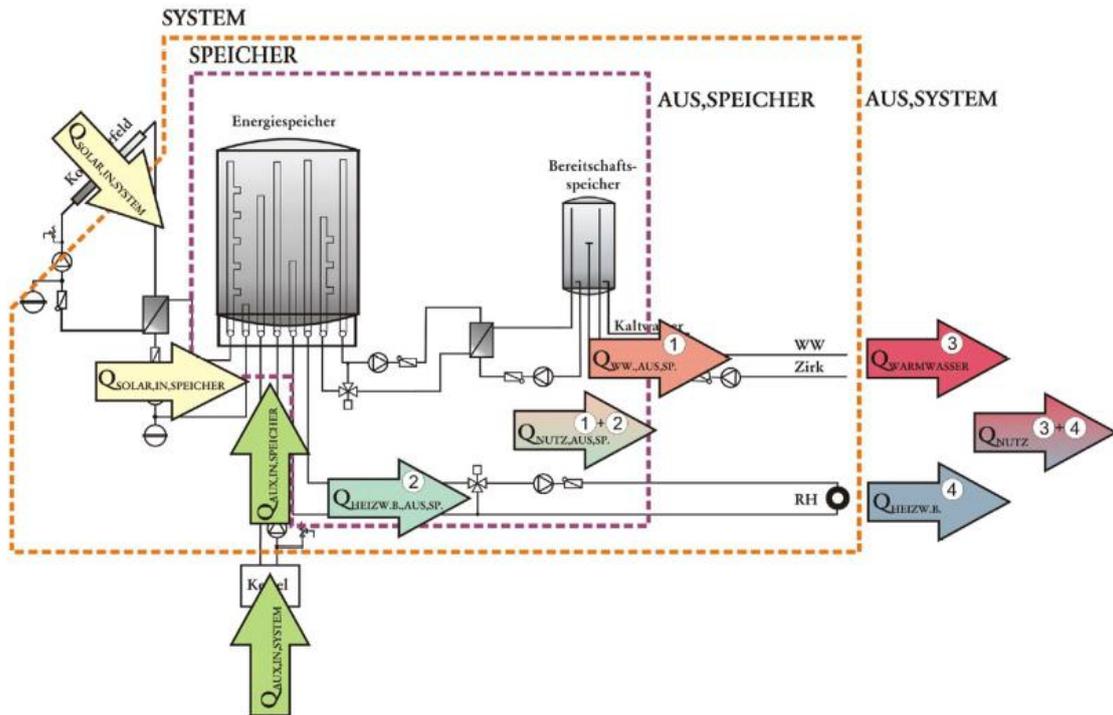


Abbildung 2-2 Verschiedene Systemgrenzen zur Berechnung des solaren Deckungsgrades (Streicher, 2008)

2.2.2 Systemnutzungsgrad

Als Systemnutzungsgrad bezeichnet man das Verhältnis von solarem Wärmeertrag zur Summe der Globalstrahlung auf die Absorberfläche während eines bestimmten Zeitraumes. Er ist ein Kennwert der die Effizienz einer Anlage beschreibt.

$$SN = \frac{Q_s}{H_g * A_{Koll}} = \frac{\text{Solarenergie}}{\text{Auf den Kollektor eingestrahlte Strahlungsenergie}} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

$$= \frac{Q_{\text{solar in Speicher}}}{Q_{\text{solar in Kollektorfläche}}}$$

Mit

SN	[-]	Systemnutzungsgrad
Q_s	[kWh/a]	solarer Wärmeertrag
H_g	[kWh/m ² a]	solare Bestrahlung
A_{Koll}	[m ²]	Absorberfläche

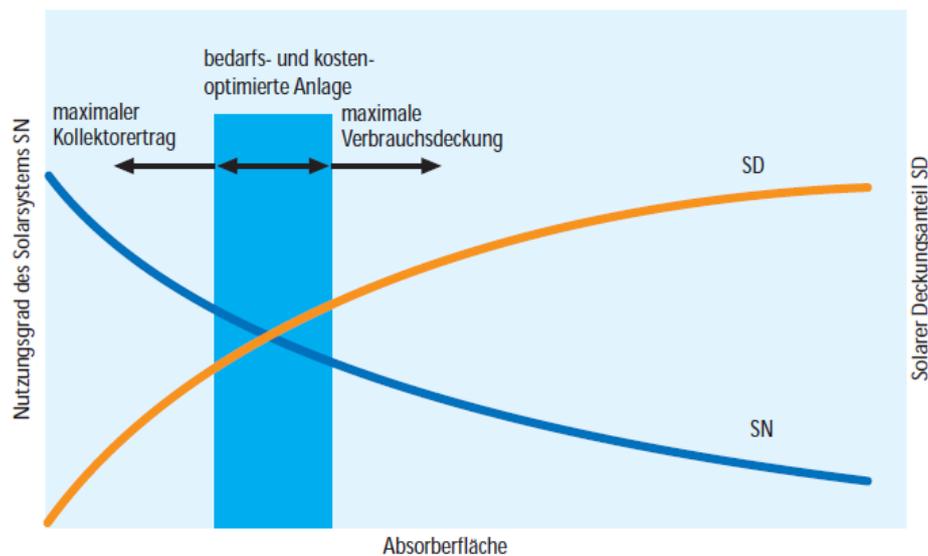


Abbildung 2-3 Solarer Deckungsgrad und Systemnutzungsgrad (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

In Abbildung 2-3 kann man sehen, wie gegenläufig diese beiden Kennzahlen sind. Um einen theoretisch möglichen 100 %-igen Deckungsgrad zu erreichen, wäre die Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht mehr gegeben. Ein weiteres Problem ist die enorme thermische Belastung im Sommer, die durch häufigere Stagnation der Solaranlage auftreten würde.

Bei der Heizungsunterstützung kann ein möglichst hoher Deckungsgrad nur durch größere Kollektorflächen realisiert werden. Da der dafür nötige Pufferspeicher aber mehr Volumen zur Verfügung stellt, und durch die wegfallende Kalkproblematik Temperaturen um 90°C erlaubt, halten sich die Stagnationszeiten in vertretbaren Grenzen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).

Für Normalverbraucher mit wirtschaftlichen Gedanken ist eigentlich nur der Bereich sinnvoll, in dem sich die SN- und SD-Linien schneiden. Dieser ist in der Abbildung 2-3 durch ein dunkelblaues Feld gekennzeichnet.

2.3 Solares Angebot und Bedarf

Wie schon früher im Abschnitt beschrieben, ist das Angebot der Sonnenstrahlung meistens nicht im gleichen Zeitraum vorhanden wie der Bedarf an Energie. In Abbildung 2-4 wird der Bedarf an Wärme mit der blauen Linie und das Angebot der Sonnenenergie mit der roten Linie im Verlauf eines Jahres dargestellt.

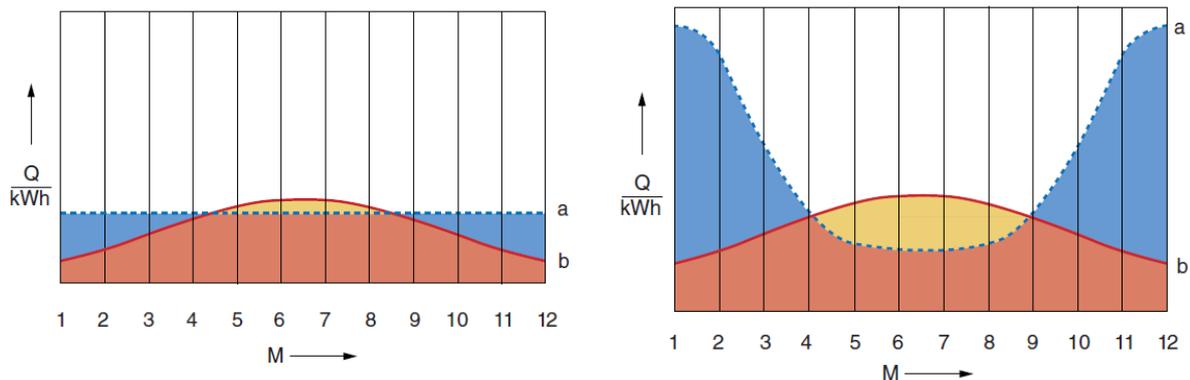


Abbildung 2-4 Energieangebot einer Sonnenkollektoranlage (b) im Verhältnis zum jährlichen Energiebedarf für Warmwasserbereitung (a) (links)
Energieangebot einer Sonnenkollektoranlage (b) im Verhältnis zum jährlichen Energiebedarf für Warmwasserbereitung und Heizung (a) (rechts) (Buderus, 2010)

Die Unterschiede über ein oder mehrere Tage lassen sich relativ einfach durch einen richtig dimensionierten Speicher ausgleichen. Der sehr große Bedarf an Wärme im Winter lässt sich aber nicht mehr durch konventionelle Speicher decken. Ein Lösungsansatz sind saisonale Speicher. Dadurch können im Sommer die hohen solaren Gewinne der Solaranlage gespeichert werden, und so den solaren Deckungsgrad erheblich steigern (Riegger, 2010). Ein weiterer Ansatz, der sich speziell bei der Kombination der Solarthermie-Anlage mit einer Wärmepumpe anbietet, ist eine aktive solare Erdschichtregeneration durchzuführen. Beide Systeme verhindern einen Stillstand des Solarkreislaufs bei vollem Wärmespeicher. Somit werden die Komponenten des Solarsystems vor Überhitzung geschont. Es ist aber anzumerken, dass saisonale Speicher nur für Großanlagen in Frage kommen, da ein sehr großer Planungs- und Errichtungsaufwand notwendig ist. Erdschichtregeneration ist dagegen im Planungsstatus recht einfach zu implementieren.

2.3.1 Energiebilanz eines Flachkollektors

Die Sonnenstrahlung (I_g) trifft auf die Glasabdeckung (siehe Abbildung 2-5). Hier wird noch vor Eintritt in den Kollektor ein kleiner Teil der Strahlung ($Q_{re,abs,1}$) an der Außen- und Innenfläche der Scheibe reflektiert. Die selektiv beschichtete Oberfläche des Absorbers reflektiert auch einen geringen Teil des Lichtes ($Q_{re,abs,2}$) und wandelt die restliche auftreffende Strahlung in Wärme um. Durch gute Wärmedämmung auf der Rückseite und an den Rändern des Kollektors werden die Verluste durch Wärmeleitung (Q_{leit}) so weit wie

möglich reduziert. Die lichtdurchlässige Abdeckung an der Frontseite des Kollektors hat die Aufgabe, die Verluste durch Wärmestrahlung (Q_{abst}) und Konvektion (Q_{konv}) von der Absorberfläche zu verringern (Treibhauseffekt). Dadurch treten lediglich Konvektions-, Leitungs- und Strahlungsverluste von der von innen erwärmten Glasscheibe an die Umgebung auf.

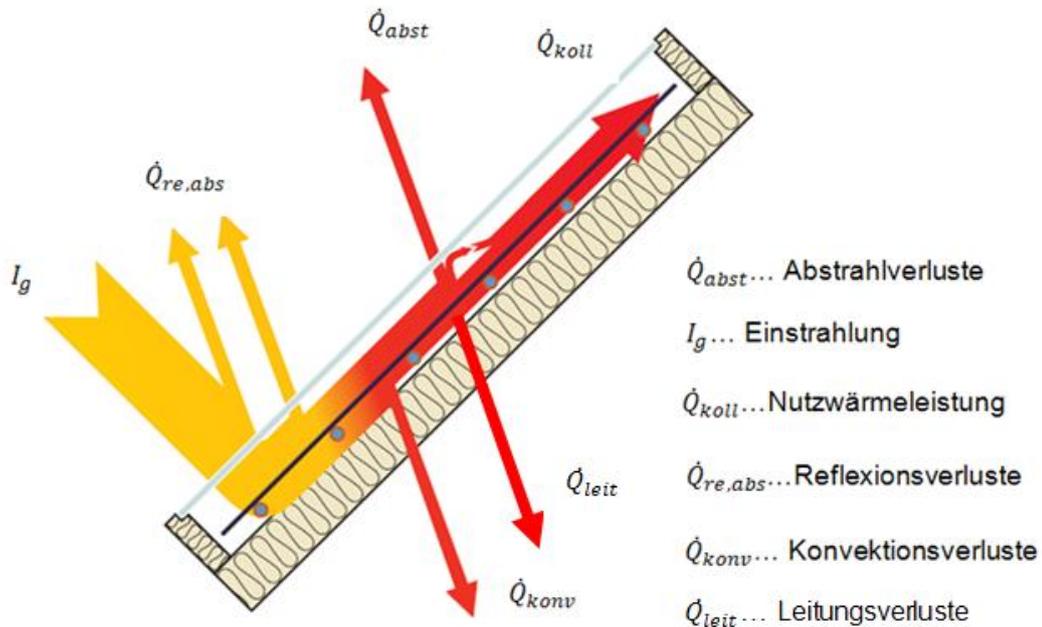


Abbildung 2-5 Energiebilanz am Kollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

2.3.1.1 Kollektorwirkungsgrad

Als Wirkungsgrad wird allgemein das Verhältnis zwischen der nutzbaren Energie und der eingesetzten Energie eines Prozesses bezeichnet. Im Falle eines Solarkollektors ist dies, das Verhältnis zwischen nutzbarer Wärmeleistung, zu der auf die Kollektorfläche eintreffenden Strahlungsleistung der Sonne.

$$\eta_{coll} = \frac{Q_{coll}}{I_g * A_{coll}}$$

Gleichung 2-3

Q_{coll}	[W]	Nutzwärmeleistung des Kollektor
I_g	[W/m ²]	auf den Kollektor eintreffende Bestrahlungsstärke
A_{coll}	[m ²]	betrachtete Kollektorfläche

Die Nutzwärme ergibt sich aus der auf den Kollektor eingestrahlte Sonnenenergie abzüglich der Reflexionsverluste, der thermischen Verluste durch Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung.

$$Q_{coll} = I_g * A_{coll} - Q_{re,abs} - Q_{abst} - Q_{konv} - Q_{leit} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

$Q_{re,abs}$	[W]	absolute Verluste durch Reflexion
Q_{konv}	[W]	Verluste durch Konvektion
Q_{leit}	[W]	Verluste durch Wärmeleitung
Q_{abst}	[W]	Verluste durch Abstrahlungswärme am Absorber

Die einzelnen Verluste sind

$$Q_{re,abs} = I_g * A_{coll} * (1 - \tau_{Abd} * \alpha_{Abs}) \quad \text{Gleichung 2-5}$$

τ_{Abd}	[-]	Transmissionsgrad der Abdeckung
α_{Abs}	[-]	Absorptionsgrad des Absorbers

$$Q_{abst} = A_{coll} * \epsilon_{Abs} * \sigma * (T_{Abs}^4 - T_a^4) \quad \text{Gleichung 2-6}$$

ϵ_{Abs}	[-]	Emissionskoeffizient des Absorbers
T_{Abs}	[K]	mittlere Absorbertemperatur
T_a	[K]	Himmelstemperatur über dem Kollektor
σ	[W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmann-Konstante (5,67x10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)

$$Q_{konv} + Q_{leit} = A_{coll} * U_{coll} * (T_{Abs}^4 - T_a^4) \quad \text{Gleichung 2-7}$$

U_{coll}	[W/m ² K]	mittlerer Wärmeverlustkoeffizient für konvektive und Leitungsverluste bei Windstille oder bei angegebener Windgeschwindigkeit
------------	----------------------	---

Daraus ergibt sich für den Wirkungsgrad eines Kollektors folgende Formel

$$\eta_{coll} = \frac{Q_{coll}}{I_g * A_{coll}} = \tau_{Abd} * \alpha_{Abs} - \frac{U_{coll}}{I_g} * (t_{Abs} - t_a) - \frac{\epsilon_{Abs} * \sigma}{I_g} * (T_{Abs}^4 - T_a^4) \quad \text{Gleichung 2-8}$$

Da die mittlere Absorbertemperatur T_{Abs} kaum messbar ist, werden alle Werte auf die mittlere Flüssigkeitstemperatur im Absorber $T_{Abs,fl}$ bezogen. Die Temperaturen am Kollektorein- $t_{Abs,ein}$ und austritt $t_{Abs,aus}$ sind leicht messbar.

$$T_{Abs,fl} = \frac{t_{Abs,ein} + t_{Abs,aus}}{2} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

$t_{Abs,ein}$	[°C]	Temperatur am Kollektoreintritt
$t_{Abs,aus}$	[°C]	Temperatur am Kollektorausritt

Für den praktischen Gebrauch wird das Strahlungsglied als quadratisches Glied mit der Umgebungstemperatur um den Kollektor in den Kollektorkennwerten berücksichtigt. Transmission-, Absorptions- und Emissionsglieder sowie der U-Wert werden zu Konstanten zusammengefasst. Mit diesen Vereinfachungen ergibt sich die Wirkungsgradkennlinie zu:

$$\eta_{coll} = \eta_0 - c_1 * \frac{t_{Abs} - t_a}{I_g} - c_2 * \frac{(t_{Abs} - t_a)^2}{I_g} \tag{Gleichung 2-10}$$

η_0	[-]	Konversionsfaktor des Kollektors (max. mögliche Wirkungsgrad)
c_1	[W/m ² K]	Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung.
c_2	[W/m ² K ²]	quadratisches Glied, Annäherung an die realen Strahlungsverluste und die Veränderlichkeit des Wärmeverlustkoeffizienten bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

Abbildung 2-6 zeigt die Wirkungsgradkennlinie für verschiedene Kollektortypen bei einer Einstrahlung von 800 W/m².

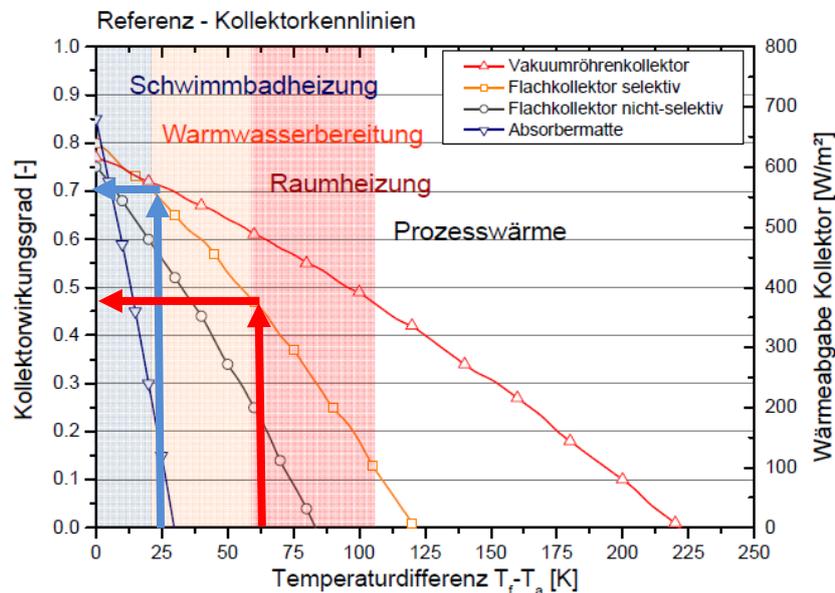


Abbildung 2-6 Kollektorkennfeld für verschiedene Kollektortypen (Streicher, 2008)

2.4 Bauformen thermischer Solarkollektoren

Am Markt gibt es eine Vielzahl verschiedener Solarkollektoren, die zur Erzeugung von Nutzwärme geeignet sind. Eine Übersicht zurzeit eingesetzter Kollektoren zeigt Abbildung 2-7.

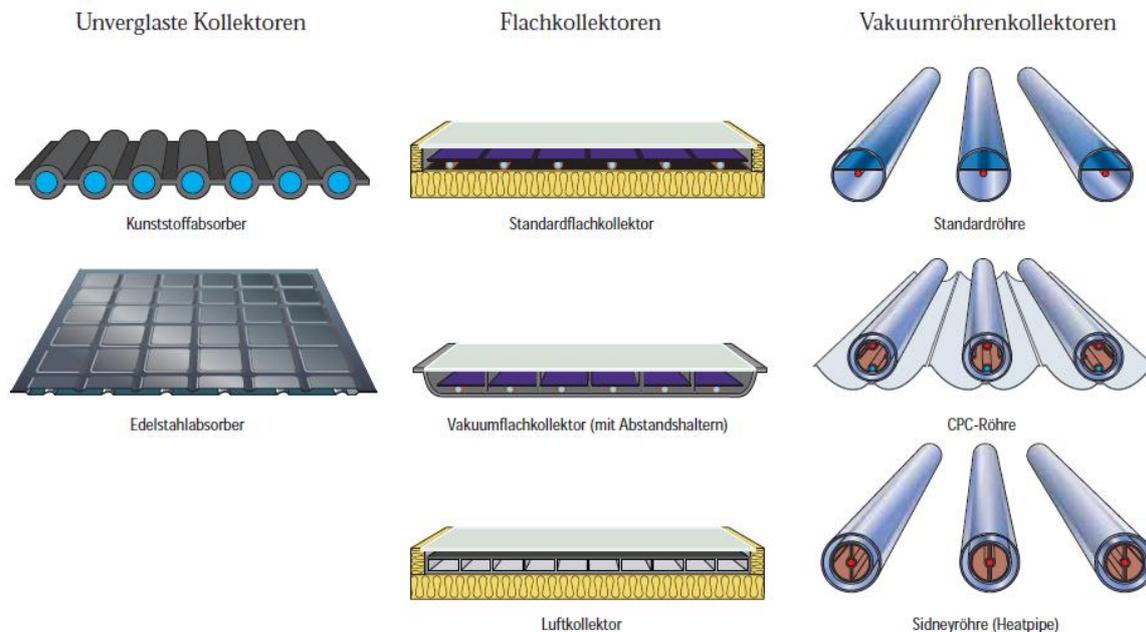


Abbildung 2-7 Verschiedene Bauformen von Solarthermiekollektoren (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

Die Kollektoren unterscheiden sich in erster Linie im Preis pro m² Kollektorfläche und deren Einsatzgebiet. Kunststoffabsorber oder Edelstahlabsorber sind beispielsweise wegen des unkomplizierten Aufbaus sehr günstig. Vakuumkollektoren haben vor allem wegen des Vakuums einen erhöhten Herstellungsaufwand, was vergleichsweise teure Kollektoren verursacht.

2.4.1 Unverglaste Kollektoren / Absorber

Unverglaste Kollektoren zeichnen sich durch den Verzicht von transparenten Abdeckungen und Wärmedämmung aus. Durch die geringen Temperaturdifferenzen zwischen Absorber und Umgebung und den relativ konstant bleibenden Rücklauftemperaturen (10 – 24 °C), ist dieser einfache Aufbau möglich. Absorber werden für verschiedene Anwendungsbereiche eingesetzt (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).

- Kunststoffabsorber zur Erwärmung von Schwimmbädern
- Edelstahlabsorber zur Trinkwasservorwärmung

Unverglaste Kollektoren haben aufgrund des einfachen Aufbaus im Vergleich zu verglasten Flachkollektoren höhere Verluste. Insbesondere Wärmeverluste, die durch Wind verursacht werden, sind stark ausgeprägt. Um die geringere spez. Leistung im Vergleich zu einem verglasten Flachkollektor auszugleichen, wird mehr Kollektorfläche benötigt. Andererseits hat die fehlende Glasabdeckung den Vorteil, dass sowohl Reflexionsverluste und deren Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel deutlich geringer sind.

Mithilfe von unabgedeckten Kollektoren kann auch beispielsweise eine Dachhaut ersetzt werden. Aufgrund der Flexibilität des Materials kann diese Kollektoren an verschiedenste Dachformen angebracht werden. Die dadurch erwirkten Einsparungen können dabei helfen, den wirtschaftlichen Einsatz zu rechtfertigen. Es lassen sich vor allem auch ästhetisch ansprechende Lösungen realisieren.

Unabgedeckten Kollektoren gibt es in vielen verschiedenen Bauformen, die sich in Material und Querschnittsgeometrie unterscheiden. Abbildung 2-8 zeigt einige gebräuchliche Querschnitte.

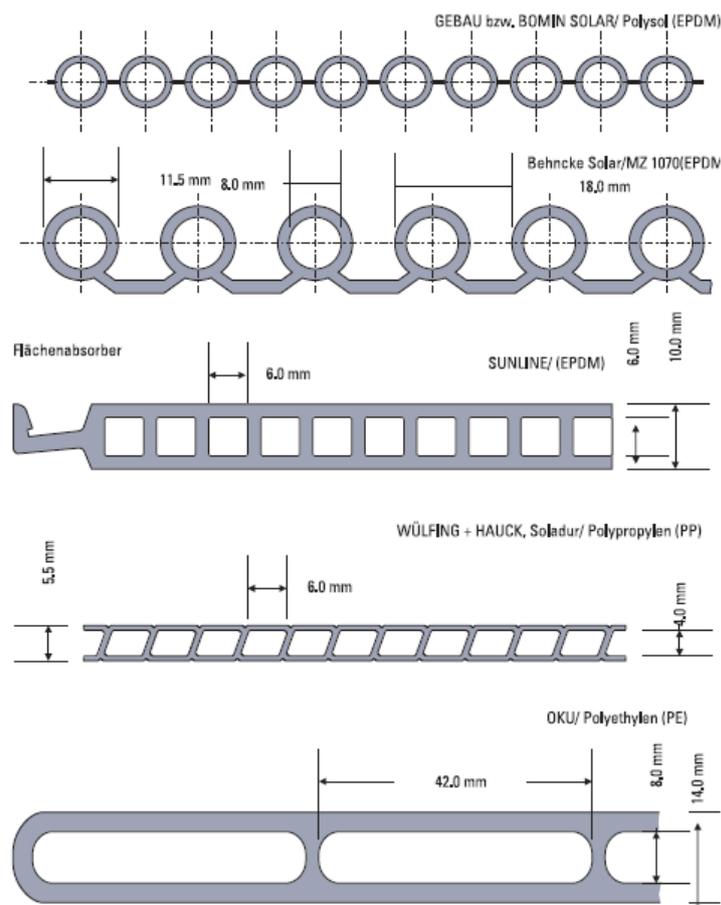


Abbildung 2-8 Querschnitte verschiedener Kunststoffabsorber (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

2.4.2 Flachkollektoren

Flachkollektoren sind in Europa die gängigsten Kollektoren für Solarthermische Systeme. Üblicherweise bestehen sie aus einem flachen rechteckigen Gehäuse. Die Rückseite und die Seitenwände sind häufig mit Mineralwolle oder anderen Dämmstoffen wärmegeklämt. Das Kernstück eines Flachkollektors ist der Absorber der die Sonnenenergie in Wärme umwandelt und an die Solarflüssigkeit abgibt. Er besteht aus einem gut leitenden Metallblech mit einer dunklen, gut absorbierenden Beschichtung. An seiner Rückseite sind Rohre angebracht, welche die Solarflüssigkeit durchströmt und dabei die Wärme abführt. Der Absorber wird mit einer transparenten Schicht, die meist aus Glas oder Kunststoff besteht, abgedeckt. Diese Abdeckung soll Wärmeverluste über die Vorderseite minimieren. Eine detailliertere energetische Betrachtung des Flachkollektors ist in Absatz 2.3.1 gezeigt.

Der Absorber hat die Hauptaufgabe, aus dem Angebot an Sonneneinstrahlung die höchstmögliche Wärmeausbeute zu erzielen. Die Energieumwandlung erfolgt hauptsächlich durch Absorption. Daher wird ein möglichst hoher Absorptionsgrad α für Licht und ein niedriger Emissionsgrad ϵ für Wärme angestrebt. Das kann mit selektiver Beschichtung erreicht werden, die die Eigenschaft hat, kurzwellige Sonnenstrahlung gut in Wärme umzuwandeln, aber gleichzeitig langwellige Wärmeabstrahlung so gering wie möglich hält. Abbildung 2-9 zeigt Kennwerte für verschiedene Beschichtung eines Kupferabsorbers.

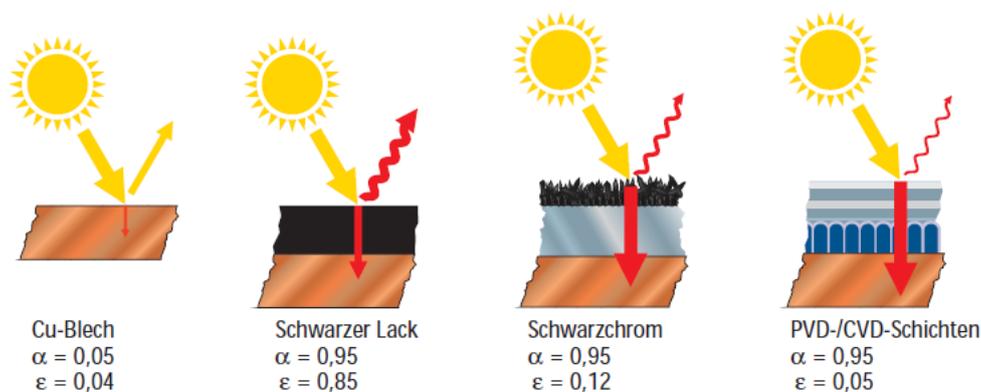


Abbildung 2-9 Verschiedene Absorberoberflächen und deren strahlungsspezifischen Kennzahlen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie die Rohrleitungen am Absorber angebracht sind, um die Wärme abzuführen. Meist werden die Rohrleitungen in Serpentin- oder Harfenform am Absorber angeschweißt. In Abbildung 2-10 sind verschiedene Absorber gezeigt.

Harfenabsorber können parallel verschalten werden. D.h. dass die Sammelrohre mehrerer Kollektoren zusammengeschaltet werden und eine große Harfe entsteht. Vorlauf und Rücklauf des Solarkreislaufs sollen in diesem Fall diagonal angeschlossen werden, um eine annähernd gleichmäßige Durchströmung der Absorberrohre zu gewährleisten.



Serpentinabsorber

Harfenabsorber

Abbildung 2-10 Bauformen von Absorbern in einem Flachkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

2.4.3 Vakuumkollektoren

Wie in Abbildung 2-7 gezeigt, werden Vakuumkollektoren grundsätzlich in Vakuumröhren- und Vakuumflachkollektoren unterteilt. Das Vakuum soll die konvektiven Verluste im Kollektor minimieren. Die meisten Vakuumröhren werden auf 10^{-5} bar evakuiert. Mit dieser Maßnahme lässt sich auch der Verlust durch Wärmeleitung minimieren. Wegen des Unterdrucks entstehen sehr hohe Kräfte, die auf die Glasröhre wirken. Der kreisförmige Querschnitt der Röhre kann diese Kräfte aber gut aufnehmen.

Der **Absorber** eines Vakuumröhrenkollektors unterscheidet sich vor allem in der Größe zu herkömmlichen Absorbern in Flachkollektoren. Er kann auf verschiedene Weise realisiert sein:

- Als flacher oder gewölbter selektiv beschichteter Blechstreifen
- Auf innenliegenden Glaskolben aufgebrachte Beschichtung

Eine weitere Unterscheidung kann durch die Bauform gemacht werden

- Direkt durchströmte Vakuumröhrenkollektoren
- Heatpipe- Vakuumröhrenkollektoren

Bei der direkt durchströmten Bauweise fließt die Solarflüssigkeit durch die Röhren. Am Sammler sind pro Röhre zwei koaxiale Rohre angebracht, die bis zum Boden der Röhre geführt sind. Während des Betriebs strömt die Solarflüssigkeit bis zum Boden und dann im Gegenstrom zurück. (Abbildung 2-11)



Abbildung 2-11 Direkt durchströmter Röhrenkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

Heatpipe-Vakuurröhren werden nicht mit dem Wärmeträgermedium durchströmt, sondern sind vom eigentlichen Solarkreislauf getrennt. In den evakuierten Röhren ist ein Wärmerohr, in dem sich Alkohol oder Wasser mit Unterdruck befindet. Bei Erwärmung verdampft das jeweilige Medium und steigt in den Kondensator, der sich im Sammelrohr des Kollektors befindet. Im Sammelrohr strömt das Wärmeträgermedium entweder „trocken“ oder „nass“ am Kondensator vorbei und kühlt diesen ab. Der Inhalt der Heatpipe kondensiert und fließt durch die Schwerkraft wieder zurück zum Boden der Heatpipe. Trocken bedeutet, dass die Vakuurröhre bei gefüllter Anlage getauscht werden kann, weil der Kondensator im Sammler dicht vom Solarkreislauf getrennt eingebettet ist. (Abbildung 2-12) Bei der nassen Ausführung wird der Kondensator der Heatpipe direkt umströmt. Daher muss beim Tausch einer Röhre zumindest der Sammler entleert werden.



Abbildung 2-12 Heatpipe Röhrenkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

Vakuumflachkollektoren unterscheiden sich von herkömmlichen Flachkollektoren nur durch die Art der Wärmedämmung. Während herkömmliche Flachkollektoren Dämmstoffe wie Mineralwolle verwenden wird der Wärmeübergang beim Vakuumflachkollektor durch das Vakuum verhindert (siehe Abbildung 2-13).

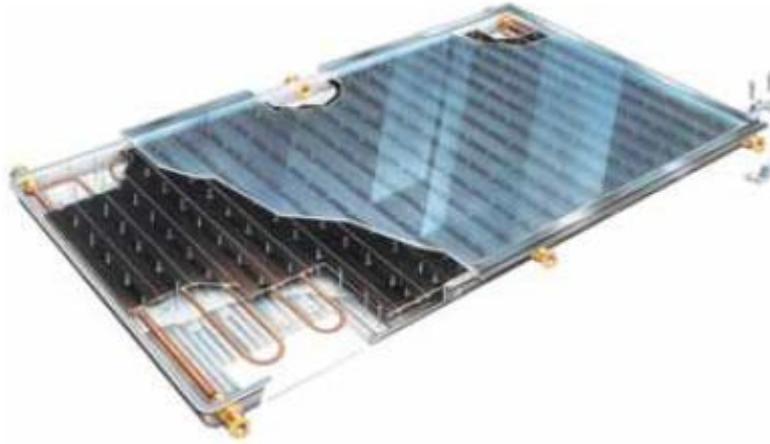


Abbildung 2-13 Vakuumflachkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)

Bei der Evakuierung entstehen sehr große Kräfte am Kollektor. Um diese aufnehmen zu können, müssen mehrere Stützelemente, die als Stege ausgeführt sind, zwischen Gehäuseboden und der Glasscheibe angebracht werden.

2.4.4 Niedersttemperaturkollektoren

Bei einem herkömmlichen Betrieb eines Flachkollektors kommt es kaum zu einer Taupunktunterschreitung im Kollektor und somit zu keiner oder nur einer geringen Ausscheidung von Kondenswasser, die den Kollektor auf längere Sicht nicht schädigen. Werden einsatzbedingt niedrige Temperaturen wie z.B. die Versorgung einer Hallenheizung oder zur Vorwärmung oder Quelle einer Wärmepumpe gefordert, kann es vorkommen, dass in den Kollektor Solarflüssigkeit gepumpt wird, deren Temperatur unter der Umgebungstemperatur des Kollektors liegt. Bei Flachkollektoren setzt sich in diesem Betriebspunkt Wasser am Absorber ab. Dieses Kondenswasser gelangt zu dem Dämmstoff, der in den meisten Fällen aus Mineralwolle besteht. Wird Mineralwolle nass, sinkt der Wärmedämmwert sehr stark ab und es ist kein effizienter Betrieb des Kollektors mehr möglich. Auch die Beschichtung des Absorbers wird durch das anfallende Wasser beschädigt.

Für solche Anwendungsfälle werden sogenannte Niedersttemperaturkollektoren verwendet. Abbildung 2-14 zeigt einen Überblick über die Einsatzbereiche herkömmlichen Niedertemperaturkollektoren und die Abgrenzung zu den Niedersttemperaturkollektoren.

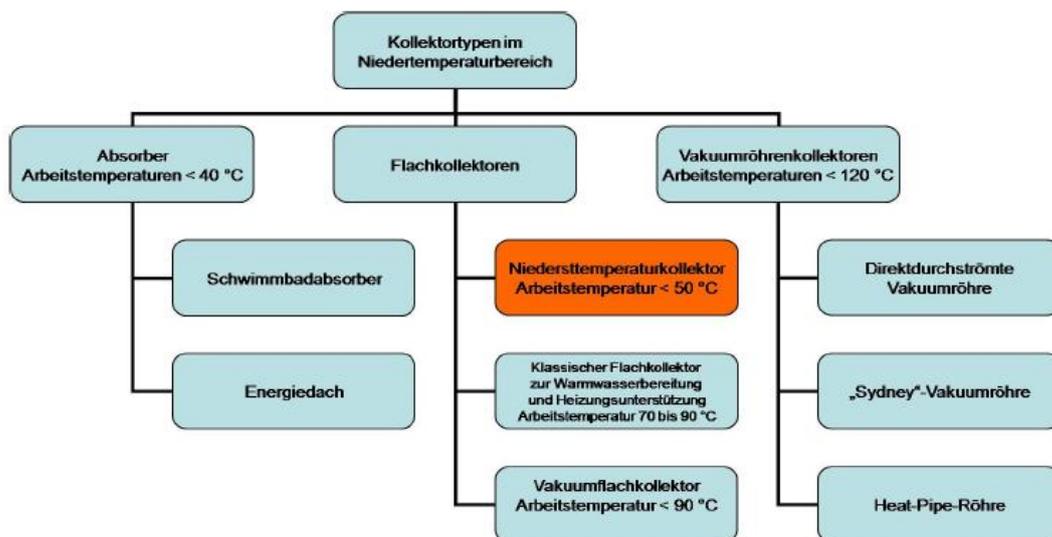


Abbildung 2-14 Niedertemperatur Kollektortypen (Müller, et al., 2008)

Niedersttemperaturkollektoren unterscheiden sich nicht wesentlich von herkömmlichen Flachkollektoren. Sie sind aber für den Betrieb bei Temperaturen unter 50 °C ausgelegt, und müssen nicht den hohen Temperaturen, die bei einem herkömmlichen Flachkollektor auftreten, standhalten. Dadurch sind andere Fertigungsverfahren und Materialien möglich. Wegen der tiefen Betriebstemperaturen kann auch Umgebungswärme zur Wärmegewinnung genutzt werden und sind daher ideal zur solarthermischen Unterstützung von einer Wärmepumpenquelle (Müller, et al., 2008).

3 Grundlagen der Wärmepumpentechnik

3.1 Der Kältekreislauf zur Erzeugung von Nutzwärme

Eine Wärmepumpe hat die Aufgabe, Wärme mit niedrigem Temperaturniveau auf höheres zu pumpen. Um diesen Effekt zu erreichen wird ein Prozess angewendet, der im 19. Jh. von Nicolas Carnot erforscht wurde. Der Carnot Prozess beschreibt einen rein theoretischen Prozess und ist der optimale Vergleichsprozess eines Kältekreislaufs.

Da in der Realität der Carnot Prozess aber nicht zu realisieren ist, muss ein anderer Vergleichsprozess gefunden werden. Der reale Kälteprozess wird durch den Perkins-Evans-Prozess beschrieben. Er besteht aus (Rieberer, 2010):

- Isentroper Verdichtung
- Isobare Enthitzung
- Isenthalpe Drosselung
- Isobare Verdampfung

Abbildung 3-1 zeigt wie ein Carnot Prozess im „T/s-Diagramm“ dargestellt wird. Im mittleren Bild ist der Carnot Prozess der Dampfkurve eines Kältemittels überlagert. Wie aber schon zu Beginn des Kapitels beschrieben, kann dieser Prozess nicht realisiert werden, weil eine Verdichtung im zwei-phasigen Gebiet insbesondere mit Kolbenkompressoren technisch nicht möglich ist (Rieberer, 2010). Der ideale technisch realisierbare Prozess (Perkins/Evans Prozess) ist in Abbildung 3-1 rechts außen abgebildet.

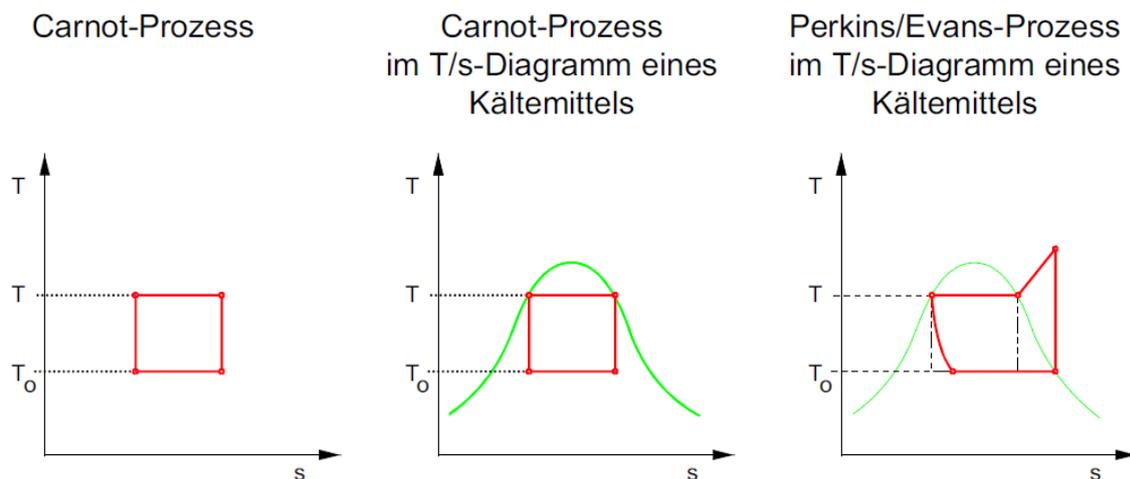


Abbildung 3-1 Realisierung eines Kältekreislaufes (Rieberer, 2010)

Der maximal mögliche Carnot-Wirkungsgrad eines Wärmepumpenprozesses kann berechnet werden mit:

$$COP_{h,c} = \frac{T}{T - T_0}$$

Gleichung 3-1

$COP_{h,c}$	[-]	Coefficient of Performance (Leistungszahl) des Carnot-Kälteprozess der Wärme als Nutzenergie erzeugt
T	[K]	obere Prozesstemperatur
T_0	[K]	untere Prozesstemperatur

Der Gütegrad (ν) des Kältekreislaufs gibt an wie effizient ein Prozess im Verhältnis zum idealen Vergleichsprozess arbeiten kann. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang für die Leistungszahl des Perkins/Evans Prozess:

$$COP_{h,p/E} = \nu * COP_{h,c}$$

Gleichung 3-2

ν	[-]	Gütegrad des Kältekreislaufs
$COP_{h,p/E}$	[-]	Coefficient of Performance (Leistungszahl) des Perkins/Evans Prozesses der Wärme als Nutzenergie erzeugt.

Dieser Kreislauf kann Nutzenergie als Kälte und Wärme bereitstellen. Zur Kühlung wird der Verdampfer als Nutzenergieerzeuger verwendet. Der Kondensator gibt die aufgenommene Wärme an die Umgebung ab. Ein Beispiel dafür ist der Kühlschrank. Um Wärme als Nutzenergie zu erzeugen muss der Verdampfer Wärme aus der Umgebung aufnehmen, und nach der Verdichtung muss der Kondensator wieder Wärme auf einem nutzbaren Temperaturniveau abgeben.

In der Abbildung 3-2 ist der schematischen Aufbau eines Kältekreislaufes zur Erzeugung von Wärme gezeigt. Als Wärmequellen sind hier Luft und Erdwärme angegeben. Eine weitere Wärmequelle wäre aber auch noch Wasser, welches entweder aus einer grundwasserführenden Schicht ausgepumpt oder direkt an einer Quelle abgezapft werden kann. Die Wärmequellen werden im Abschnitt 0 noch genauer beschrieben.

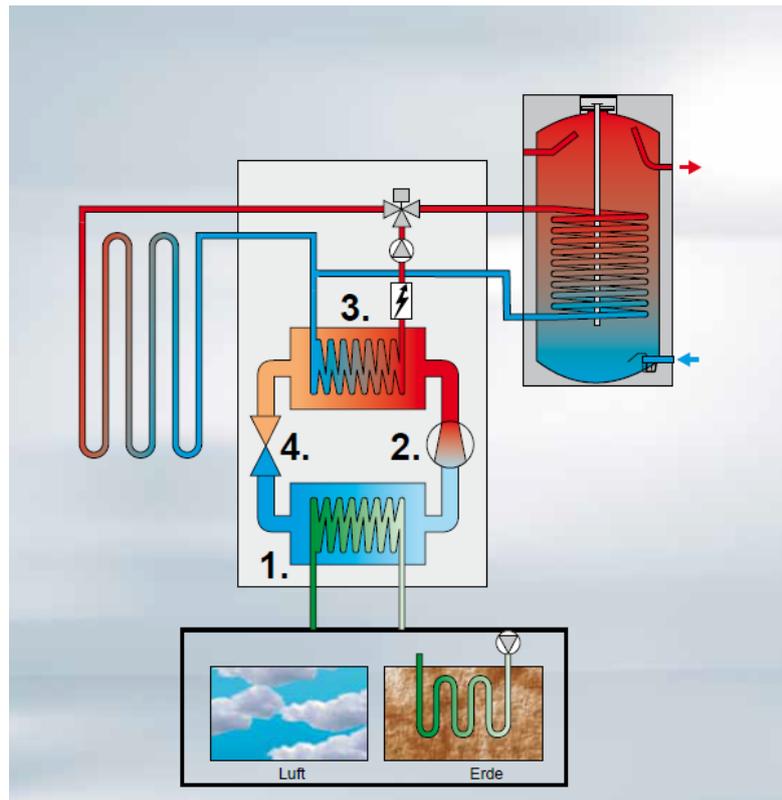


Abbildung 3-2 Kältekreislauf einer Wärmepumpe zur Versorgung eines Haushalts (Wolf GmbH, 2011)

Verdampfer

Die Umweltenergie aus der Luft oder der Erde bringt das in der Wärmepumpe zirkulierende Medium zum Verdampfen und versetzt es somit in einen gasförmigen Zustand.

Verdichter

Der elektrische Verdichter saugt das verdampfte Medium an. Dort wird es stark verdichtet und dadurch auf ein hohes Temperatur und Druckniveau gebracht. In Kältemaschinen werden zur Verdichtung oft Hubkolbenverdichter, Scrollverdichter oder Turbokompressoren verwendet. Eine Sonderform stellen Sorptionswärmepumpen dar. Diese absorbieren den Dampf durch Wärmeentzug und geben diesen bei Zufuhr von Wärme wieder ab. Ein Verdichter entfällt bei dieser Ausführung, allerdings wird eine Pumpe für den Absorptionskreislauf benötigt.

Kondensator

Diese Wärmeenergie auf hohem Temperaturniveau und Druckniveau wird an den Heizungskreislauf abgegeben. Das gasförmige Medium kühlt sich dabei ab und wird wieder flüssig. Die Verdampfung und Kondensation wird beispielsweise durch Plattenwärmetauscher oder Rohrbündelwärmetauscher realisiert.

Expansionsventil

Der Druck wird abgebaut, das abgekühlte Medium kann wieder Umweltwärme aufnehmen und der Kreislauf beginnt von neuem. Expansionsventile können so ausgeführt werden, dass

sie am Verdampferaustritt eine Überhitzung, bzw. am Kondensatoraustritt eine Unterkühlung des Kältemittels hervorrufen.

3.2 Effizienz der Wärmepumpe

Die Effizienz eines Wärmepumpenprozesses zu einem bestimmten Zeitpunkt wird durch den COP angegeben. COP bedeutet Coefficient of Performance (Leistungszahl) und gibt das Verhältnis der Heizleistung (Q_{WP}) zur effektiven Leistungsaufnahme der Wärmepumpe (P_{el}) an.²

$$COP = \frac{Q_{th}}{P_{el}}$$

Gleichung 3-3

COP	[-]	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
Q_{th}	[W]	Nutzwärmeleistung der Wärmepumpe
P_{el}	[W]	Elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe

Die Leistungsaufnahme ergibt sich aus:

1. hauptsächlich der elektrischen Leistungsaufnahme für den Betrieb des Verdichters
2. der elektrischen Leistungsaufnahme aller Steuer-, Regel- und Sicherheitseinrichtungen
3. der anteiligen Leistungsaufnahme der Sole- bzw. Heizungspumpe zum Transport der Sole bzw. des Heizungswassers innerhalb der Wärmepumpe

Der COP ist lediglich eine Momentaufnahme und gilt nur für einen bestimmten (definierten) Zeitpunkt bzw. Betriebspunkt. Um möglichst hohe COP-Werte zu erreichen, muss die Quelltemperatur hoch und die Temperatur der Senke niedrig sein, d.h. die Temperaturdifferenz sollte möglichst gering sein. Fußbodenheizungen eignen sich am besten für den Betrieb mit Wärmepumpen, da diese Vorlauftemperaturen um nur ungefähr 35 °C benötigen.

Luftwärmepumpen sind für ihre niedrigen Leistungszahlen im Winter bekannt. Diese resultieren aus den tiefen Außenlufttemperaturen und den gleichzeitig hohen Vorlauftemperaturen im Heizsystem (außentemperaturabhängige Vorlauftemperatur).

Die Arbeitszahl AZ oder PF (Performance Faktor) stellt das Verhältnis zwischen der abgegebenen Wärmemenge (Q_{th}) zur aufgenommenen elektrischen Energie (W_{el}) im jeweiligen Zeitraum dar. Meistens wird als Bezugszeitraum ein Jahr gewählt. In diesem Fall werden die Kennwerte dann JAZ (Jahresarbeitszahl) oder SPF (Season Performance

² Messung nach EN 14511

Factor) genannt. Es sind durchaus auch kürzere Bezugszeiträume üblich, wie z.B. eine Tagesarbeitszahl (TAZ) oder Monatsarbeitszahl (MAZ).

$$SPF = \frac{Q_{th(HP)}}{W_{el(HP)}}$$

Gleichung 3-4

SPF	[-]	Season Performance Factor oder auch Arbeitszahl (AZ)
$Q_{th(HP)}$	[Wh]	Nutzwärmemenge die in einem bestimmten Zeitraum abgegeben wurde
$W_{el(HP)}$	[Wh]	Elektrische Arbeit die in dem Bezugszeitraum vom Verdichter der Wärmepumpe aufgenommen wurde

Wie auch für den Carnot-Prozess, der ja den idealen Kältekreis beschreibt, gilt auch hier, je kleiner die Differenz zwischen Wärmequellentemperatur und Heizungsvorlauftemperatur ist, umso besser wird die Arbeitszahl und umso effizienter arbeitet die Anlage. Der reale Kälteprozess muss sich aber am Perkins/Evans-Prozess orientieren. Die idealen Zustandsänderungen des Perkins/Evans-Prozesses sind in Realität nicht möglich. Daher muss die Leistungszahl einer realen Wärmepumpe sowohl unter dem Carnot- wie auch unter dem eines Perkins/Evans-Prozess liegen.

3.3 Wärmequellen für Wärmepumpe

Die Wärmequelle hat einen wesentlichen Einfluss auf den wirtschaftlichen Einsatz der Wärmepumpe. In der Heizungstechnik werden hauptsächlich folgenden Wärmequellen herangezogen.

- Außenluft
- Erdreich
- Grundwasser

3.3.1 Außenluft

Außenluft hat den großen Vorteil, dass sie überall vorhanden ist. Im Gegensatz zu Erdwärme, wo Bohrungen oder Grabung notwendig sind, kann sie auch sehr einfach genutzt werden. Daher wird Außenluft vor allem bei Altbausanierungen eingesetzt.

Abbildung 3-3 zeigt die Energieströme dieses Systems in Form von Pfeilen. Die warme Umgebungsluft wird angesaugt und durchströmt den Verdampfer wo sie abkühlt. Anschließend wird die abgekühlte Luft wieder an die Umgebung abgegeben.

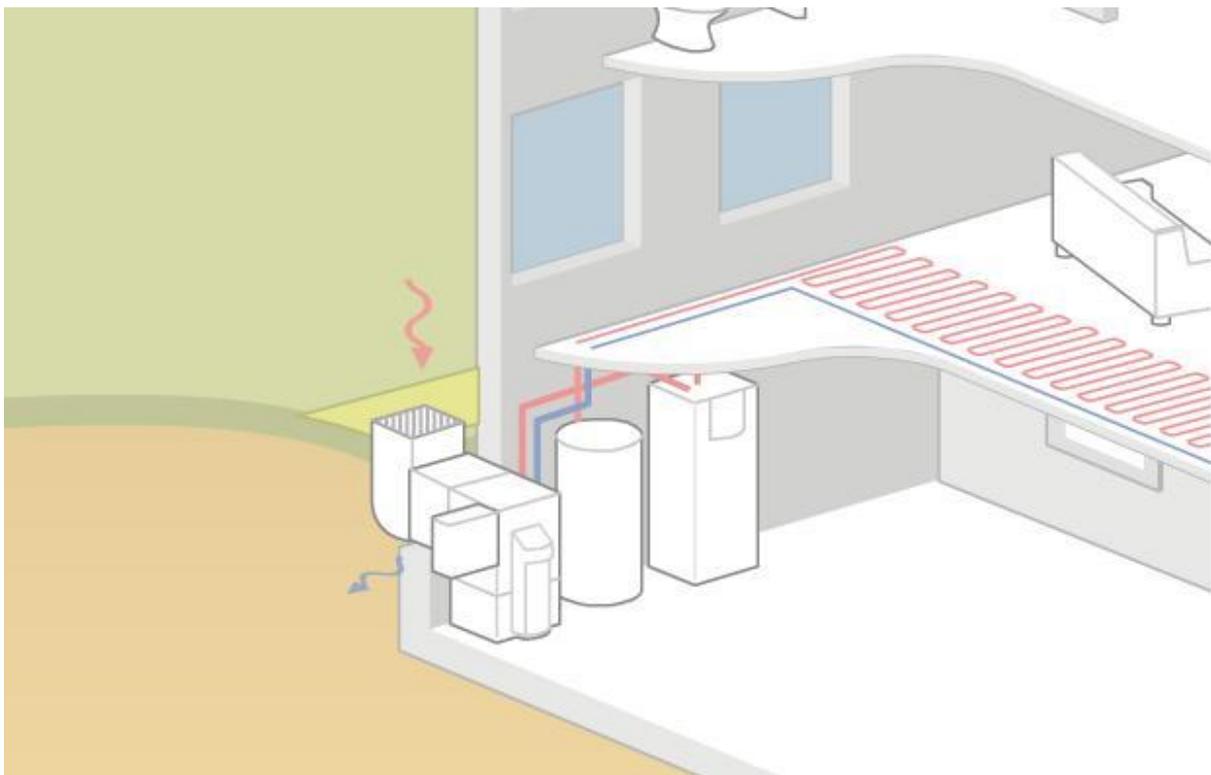


Abbildung 3-3 Luftwärmepumpe mit nach außen führenden An- und Absaugkanal (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

Im Winter ist naturgemäß der Heizbedarf am größten. In dieser Zeit liegt aber auch die größte Schwäche der Luft-Wärmepumpe. Die geringe Ansaugtemperatur der Luft im Winter senkt die Effizienz der Wärmepumpe, da diese direkt von der Wärmequellentemperatur und

Wärmesenke-Temperatur abhängig ist (siehe Gleichung 3-1). Im Vergleich zu erdgekoppelten Wärmepumpen steigen die Stromkosten, um den Wärmebedarf zu decken um 4 bis 8 % pro Jahr. Diese Mehrkosten stehen aber im Gegensatz zu den geringeren Investitionskosten einer Luft-Wärmepumpe. Die Mehrkosten zur Anschaffung einer Erdwärmepumpe für ein Einfamilienhaus betragen im Durchschnitt 3000 Euro (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

3.3.2 Erdreich

Das Erdreich bietet im Gegensatz zur Umgebungsluft über das ganze Jahr eine annähernd konstante Wärmequellen-Temperatur. Abbildung 3-4 zeigt den Temperaturverlauf über die Erdreichtiefe in verschiedenen Jahreszeiten.

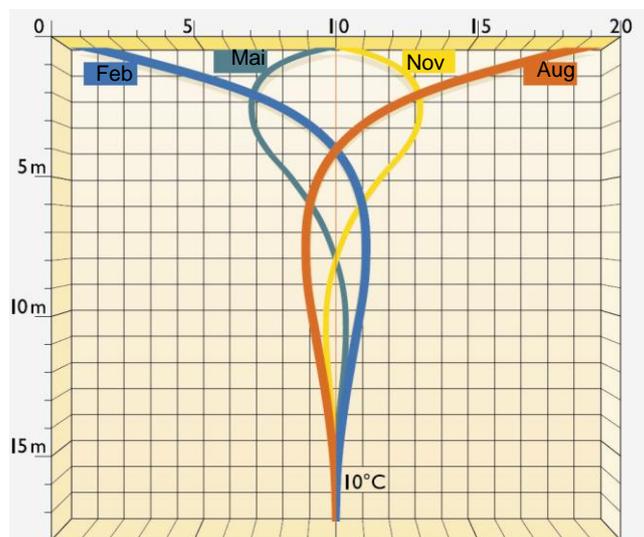


Abbildung 3-4 Temperaturverlauf der Erdreichtiefe an verschiedenen Zeiten im Jahr (Wolf GmbH, 2011)

Beim Entzug von Wärme aus dem Erdreich sind Richtlinien einzuhalten um die Nachhaltigkeit zu gewährleisten und Frostschäden zu vermeiden (Rieberer, 2010). Auf diese Richtlinien wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

Dem Erdreich kann über zwei Wege Energie entzogen werden.

- Erdsonde
- Erdkollektor

Der Ausgleich des Energiedefizits durch den Entzug von Wärme wird Regeneration genannt. Diese Regenerierung erfolgt vor allem im Sommer indirekt mit der Energie der Sonne. Das bedeutet, dass dem Erdreich durch Sonne, Wind und Regen wieder Wärme zugeführt wird. Darum ist speziell bei Erdkollektoren darauf zu achten, dass dem Erdreich dem Energie entzogen wird, nicht durch Bauten die Möglichkeiten zur Regeneration genommen wird.

Diese Arbeit betrachtet die Möglichkeit zur Regenerierung durch überschüssige Wärme von Solarkollektoren im Abschnitt 4.5.3.

3.3.2.1 Erdsonde

Wenn nicht genügend Gartenfläche vorhanden ist, um Erdkollektoren zu verwenden, kann man alternativ eine Erdbohrung durchführen lassen oder sogenannte Energiepfähle in den Boden rammen (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011). Der Wärmeentzug erfolgt dann über eine oder mehrere Sonden. Abbildung 3-5 zeigt den Aufbau einer Erdsonde.

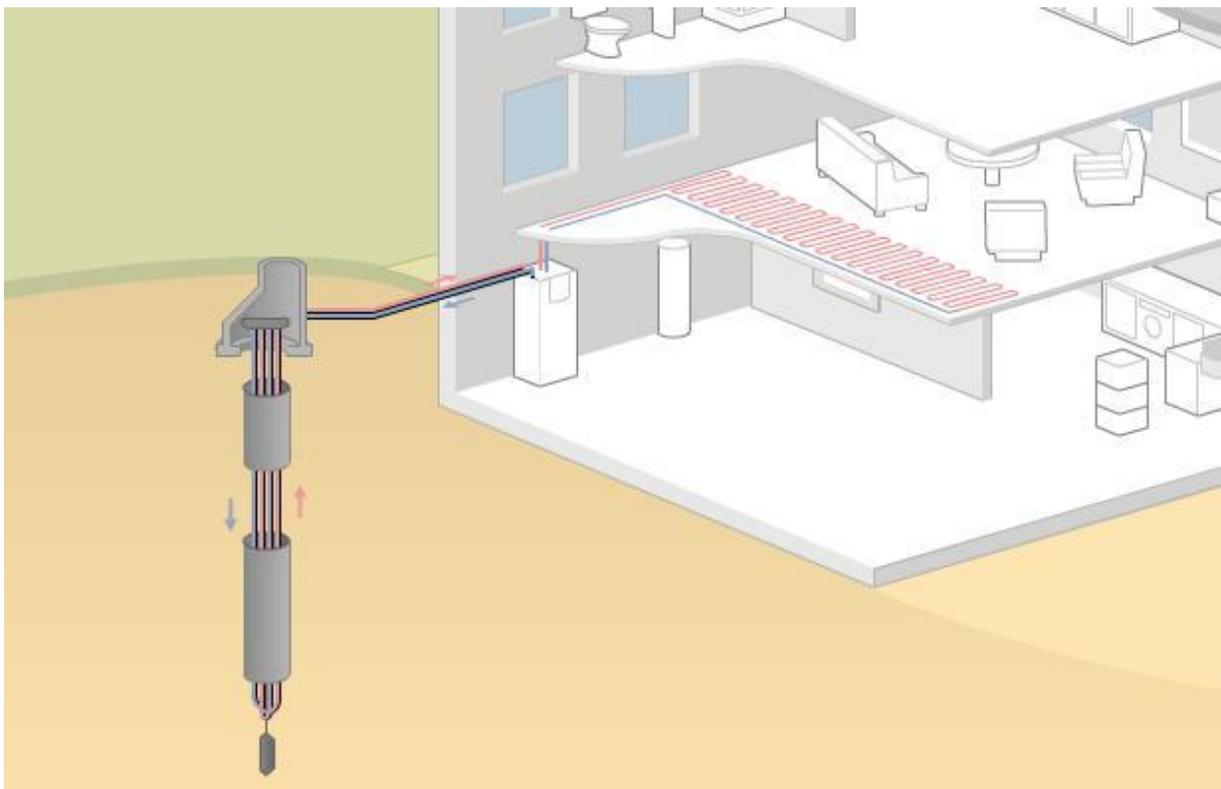


Abbildung 3-5 Wärmepumpe mit Erdsonde (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

Bei Erdwärmesonden fließt frostsicheres Arbeitsmittel (Sole) durch zwei U-förmige Kunststoffrohre, die bis ca. 100 m Tiefe in das Erdreich ragen können. Bohrungen, die über 100 m hinausgehen, fallen in das Bergbaugesetz, und werden daher, wenn möglich, vermieden. Während der Durchströmung der Sonde entzieht die Sole dem Erdreich Wärme und stellt sie dem Verdampfer der Wärmepumpe zur Verfügung. In Abbildung 3-3 kann man sehen, dass die Erdreichtemperatur ab einer Tiefe von 10 m das ganze Jahr über fast konstant ist. D.h. die Erdsonde arbeitet über das ganze Jahr annähernd gleich effektiv.

Die Tiefe der Bohrung ist von der Erdbeschaffenheit abhängig. Je höher die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Erdreichs ist, umso geringer kann die Bohrtiefe gewählt werden. Tabelle 3-1 zeigt in Anlehnung des Nomogramms zur Erdwärmesonden-

Auslegung laut VDI4640 (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011) einige Werte.

Tabelle 3-1 spezifische Entzugsleistung und Sondenlänge³

Untergrund	spezifische Entzugsleistung	
	für 1800 h	für 2400 h
<i>Allgemeine Richtwerte:</i>		
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1,5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	25 W/m	20 W/m
Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5\text{--}3,0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	60 W/m	50 W/m
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3,0 \text{ W/(m} \cdot \text{L)}$)	84 W/m	70 W/m
<i>Einzelne Gesteine:</i>		
Kies, Sand, trocken	< 25 W/m	< 20 W/m
Kies, Sand, wasserführend	65–80 W/m	55–65 W/m
Bei starkem Grundwasserfluss in Kies und Sand, für Einzelanlagen	80–100 W/m	80–100 W/m
Ton, Lehm, feucht	35–50 W/m	30–40 W/m
Kalkstein (massiv)	55–70 W/m	45–60 W/m
Sandstein	65–80 W/m	55–65 W/m
saure Magmatite (z. B. Granit)	65–85 W/m	55–70 W/m
basische Magmatite (z. B. Basalt)	40–65 W/m	35–55 W/m
Gneis	70–85 W/m	60–70 W/m
Die Werte können durch die Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung erheblich schwanken.		

In den ersten Jahren laufen diese Systeme meist mit sehr zufriedenstellenden Arbeitszahlen. Mit der Zeit zeigt sich aber eine Reduzierung der durchschnittlichen jährlichen Erdtemperatur. In Abbildung 3-6 wird der typische Verlauf der minimalen Erdtemperatur über mehrere Jahre beim Betrieb mit einer Erdsonde veranschaulicht. Man kann deutlich erkennen, dass die Temperatur in den ersten 5 Jahren stark abfällt. Bei der Auslegung der Erdsonde sollte darauf geachtet werden, dass die mittlere Sonden-Temperatur knapp über 0 °C liegt. Bei einer Unterdimensionierung kann das Gebäude nicht ausreichend mit Wärme versorgt werden. Eine Überdimensionierung sollte wegen der unnötigen Investitionskosten vermieden werden.

³ VDI 4640 (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011)

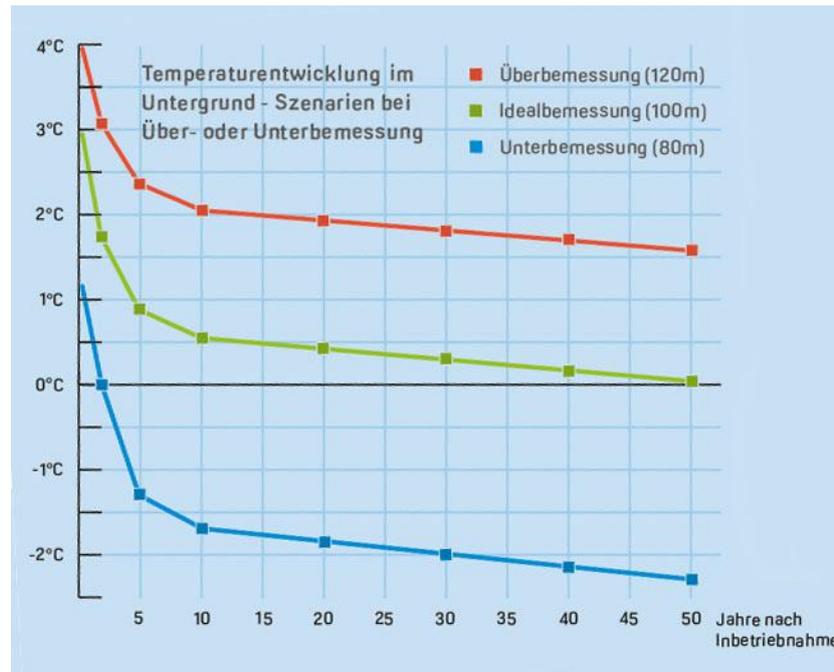


Abbildung 3-6 Verlauf der minimalen Temperatur im Erdreich über mehrere Jahre (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

Wie schon angesprochen, bietet das Erdreich über ein Jahr relativ konstante Temperaturen. Da der Wärmepumpenkreislauf sich nicht von einem Kühlkreislauf unterscheidet, könnten die kühlen Erdreichtemperaturen im Sommer auch zur Kühlung des Gebäudes verwendet werden.

Eine Tiefenbohrung ist in den meisten Fällen zwar ungefährlich, es soll aber an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass bei falscher Planung durchaus längerfristige Probleme resultieren können. Problematisch ist vor allem das Durchbrechen von Erdgasblasen und wasserführenden Erdschichten. Daher ist eine sorgfältige geologische Betrachtung des Erdreichs in der Bauvorbereitung zu beachten.

3.3.2.2 Erdkollektor

Erdkollektoren sind Rohrsysteme, die in geringer Tiefe verlegt werden. Es werden viele verschiedene Varianten am Markt angeboten, wie z.B. Körbe oder großflächige Matten. Diese müssen unter die Frostgrenze, d.h. mindestens 1,2 m tief verlegt werden. Die von der Oberfläche zufließende Wärmemenge nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Aus diesem Grund sollen die Kollektoren jedoch nicht tiefer als 1,5 m vergraben werden um ein Enteisen dieser im Frühjahr zu ermöglichen.⁴ In Abbildung 3-7 wird ein Erdkollektor mit zwei parallele Kreise gezeigt. Bei größeren Anlagen sind mehrere parallel Kreise vorteilhaft, da unnötiger Druckverlust vermieden wird.

⁴ (VDI 4046) (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011)

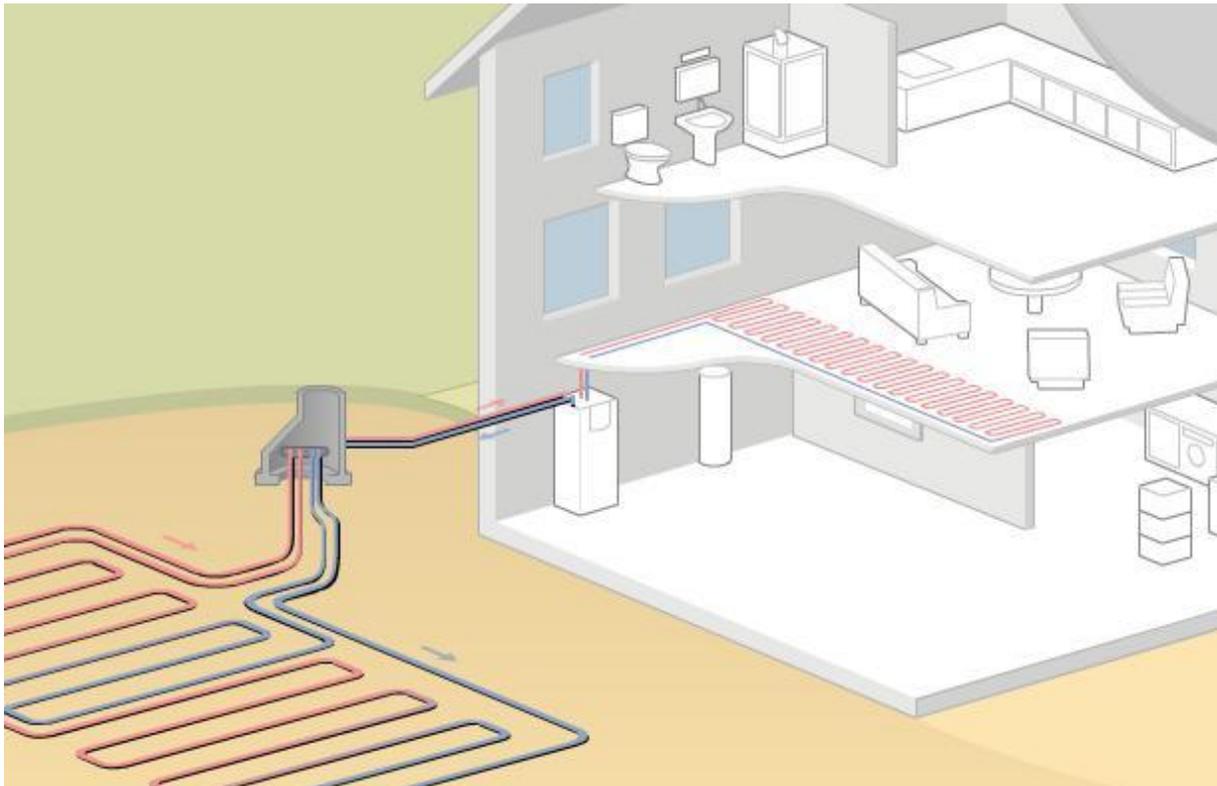


Abbildung 3-7 Wärmepumpe mit zwei parallelen Erdkollektorkreisen (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

Wie bei den Erdsonden müssen auch hier Richtlinien bei der Auslegung eingehalten werden. Diese sind in der VDI 4640 geregelt (siehe Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2 Erlaubte spezifische Entzugsleistung bei verschiedenem Untergrund (1800 h/2400 h ohne/mit Warmwasserbedarf) (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011)

Untergrund	spezifische Entzugsleistung	
	bei 1800 h	bei 2400 h
Trockener, nichtbindiger Boden	10 W/m ²	8 W/m ²
Bindiger Boden, feucht	20–30 W/m ²	16–24 W/m ²
Wassergesättigter Sand/Kies	40 W/m ²	32 W/m ²

Bei längeren Laufzeiten ist neben der spez. Entzugsleistung auch die spez. Entzugsarbeit zu berücksichtigen. Für Erdwärmekollektoren sollte dieser zwischen 50 und 70 kWh/m²a liegen.⁵

⁵ VDI 4640 (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011)

3.3.3 Grundwasser

Vorraussetzung zur Nutzung von Grundwasser ist, dass Grundwasser in ausreichender Menge und in geringer Tiefe vorhanden ist. Um diese Wärmequelle nutzen zu können, bietet sich eine Wasser/Wasser Wärmepumpe an. Wie in Abbildung 3-8 zu sehen ist, wird das Wasser durch einen Förderbrunnen hochgepumpt, und anschließend im Verdampfer der Wärmepumpe abgekühlt. Das kalte Wasser wird einem Schluckbrunnen wieder rückgeführt und somit der Kreislauf geschlossen.

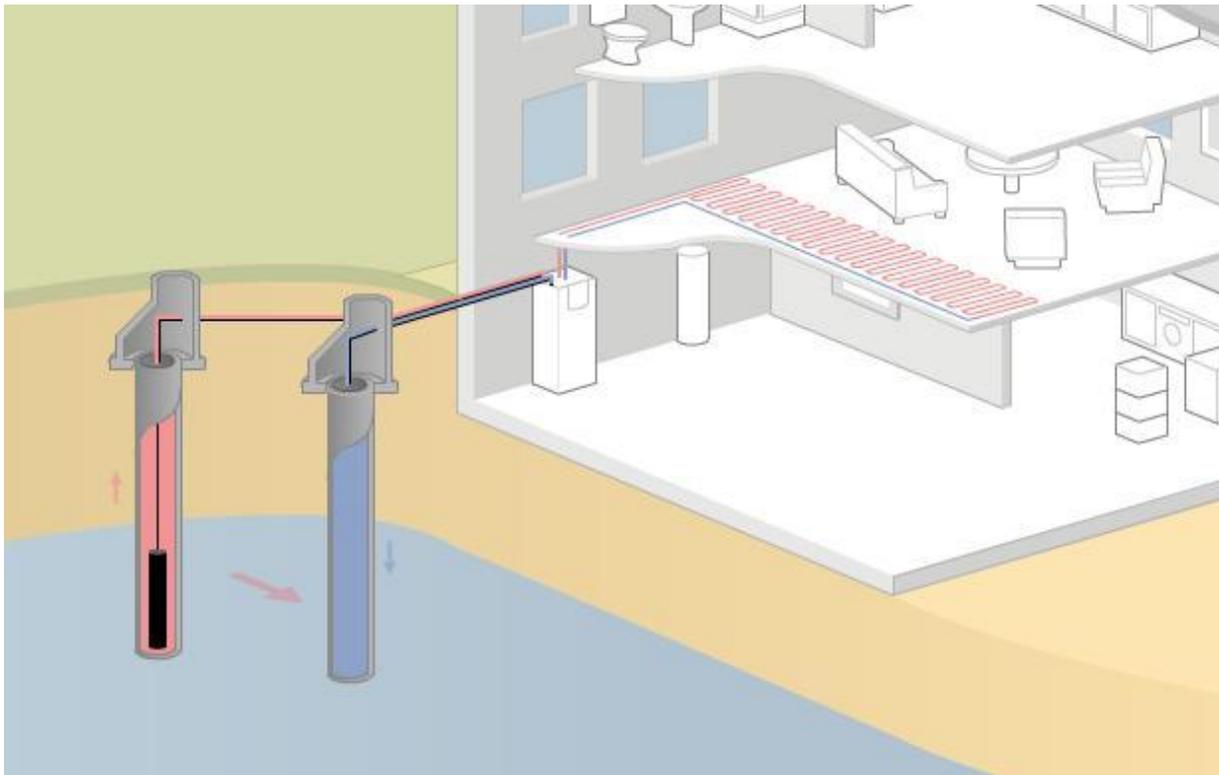


Abbildung 3-8 Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

Die Wassertemperatur bleibt über die Heizperiode relativ konstant und geht auch im Winter nicht weit unter 10 °C. Im Sommer besteht die Möglichkeit der passiven Kühlung. Nachteilig sind der hohe Planungsaufwand sowie der große Anteil der Hilfsenergie durch die Pumpen während des Betriebs. Aus diesem Grund wird dieses System hauptsächlich für größere Anlagen verwendet.

Bei der Auslegung ist darauf zu achten, dass die Abkühlung bzw. bei Raumkühlung die Erwärmung des Grundwassers nicht mehr als 6 K betragen soll. Die Brunnenleistung muss eine Dauerentnahme für den Nenndurchfluss der angeschlossenen Wärmepumpe gewährleisten. Dies entspricht etwa 0,25 m³/h für jedes Kilowatt Verdampfer-Leistung. Die Ergiebigkeit eines Brunnens hängt von den örtlichen geologischen Gegebenheiten ab. Sie ist über Pumpversuche nachzuweisen.⁶

⁶ VDI 4640 (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)

4 Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe

Die Kombination von thermischen Solaranlagen mit Wärmepumpen zu sogenannten Solar-Wärmepumpensystemen scheint auf den ersten Blick eine erfolgsversprechende Möglichkeit zur Realisierung innovativer Heizungssystemen zu sein. In den 80'er Jahren wurden im Zuge von allgemeinen Energiesparbemühungen wegen der beiden Ölkrisen Solar-Wärmepumpensysteme untersucht, teilweise mit vielversprechenden Ergebnissen (Trinkl, et al., 2005).

Die Vorteile der Systeme, die die thermische Solaranlage auch aktiv in die Niedertemperaturseite der Wärmepumpe einbinden, soll:

- einen erhöhten solaren Kollektorertrag
- eine Verbesserung der Wärmepumpenarbeitszahl
- die Verringerung der Wärmepumpenlaufzeit
- der Verzicht auf großflächige Erdwärmetauscher sein.

4.1 Vorteile seitens der Solarthermie

4.1.1 Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades

In Abschnitt 2.3.1.1 wurde gezeigt, dass der Kollektorwirkungsgrad von der Einstrahlung auf die Kollektorfläche und von der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorbenttemperatur und Außenlufttemperatur abhängig ist (Gleichung 2-10). In Abbildung 4-1 ist die Wirkungsgradkurve des Kollektors F3-1, der auch später in der Simulation verwendet wurde, gezeigt. An der X-Achse ist die Temperaturdifferenz pro 1000 W/m^2 Einstrahlung aufgetragen. Bei normalem Betrieb des Kollektors wird sich eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von ca. 40 K einstellen. Bei 1000 W/m^2 ergibt sich dann ein Wirkungsgrad des Kollektors (η_{Koll}) von 66 %. Wird der Kollektor zur Quellentemperaturerhöhung einer Wärmepumpe verwendet sind Temperaturdifferenzen von ca. 0 – 10 K zu erwarten. Es stellt sich dann annähernd der maximale Wirkungsgrad von 80 % ein. Es können also Wirkungsgradsteigerungen von 10 – 15 % erwartet werden.

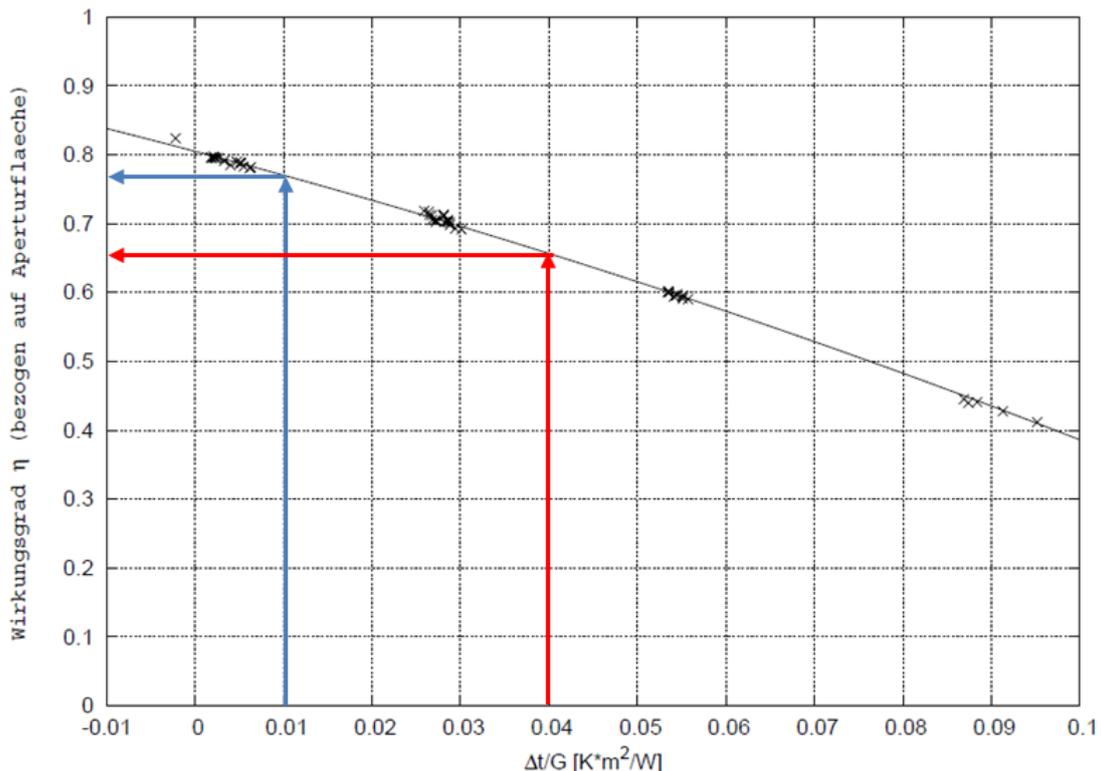


Abbildung 4-1 Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades durch Reduktion der Temperaturdifferenz zwischen mittleren Kollektortemperatur und Außenlufttemperatur; rot: Normalbetrieb, blau: Betrieb im Niedertemperaturbereich

4.1.2 Vermeidung von Stagnation

Bei Solarthermieanlagen mit großen Absorberflächen kann es im Sommer wegen großer Sonneneinstrahlung zu einem Überangebot an Solarer Wärme kommen, das von den Speichern nicht mehr aufgenommen werden kann. Die Folge ist ein Stillstand (Stagnation) des Solarkreises. Da die in den Absorbern entstandene Wärme nicht mehr abtransportiert

wird, kommt es zu einer Überhitzung der Absorber und der beinhaltenen Solarflüssigkeit. Diese extreme thermische Belastung führt zu einer Reduktion der Lebensdauer der Komponenten, und sollte wenn möglich vermieden werden.

Wird die solare Wärme zur Regeneration des Erdreichs einer Sole-Wärmepumpe verwendet, kann eine Stagnation ausgeschlossen werden, sofern keine maximale Temperaturerhöhung des Erdreichs vorgesehen ist.

4.1.3 Erhöhter Kollektorertrag durch längere Betriebszeiten

Bei der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen wird versucht, auch trotz sehr niedriger solarer Temperaturen, Solarenergie in den Speicher einzubringen. Zusätzlich wird bei einer aktiven Erdreichregeneration und mit einem Pufferspeicher als Wärmequelle, mehr Speicherplatz produziert. Das ruft längere Laufzeiten hervor, und dadurch entstehen höhere solare Deckungsgrade.

4.2 Vorteile seitens der Wärmepumpe

4.2.1 Verbesserung des COPs

Wie im Kapitel 3.2 gezeigt ist die maximale Leistungszahl und damit die Effizienz eines Kältekreislaufs mit dem Carnot Wirkungsgrad vorgegeben. Dieser ist von der oberen und unteren Prozesstemperatur abhängig (Gleichung 3-1). Je näher diese aneinander liegen umso besser wird die Effizienz der Wärmepumpe. Das obere Temperaturniveau ist von der gewünschten Warmwassertemperatur und Raumtemperatur abhängig. Wie man in Abbildung 4-1 sehen kann, liegt dieses im Heizungsbereich zwischen 35 °C und 55 °C, und wird aus Komfortgründen kaum verändert. Somit ist die einzige Möglichkeit zur Verbesserung der Effizienz die Anhebung der Quellentemperatur. Durch überschüssige Solarwärme kann das erreicht werden. Um eine COP-Steigerung von 1 zu erreichen müsste bei einer Wärmesenke-Temperatur von 35 °C eine Temperaturanhebung der Quelle von 7 K erfolgen.

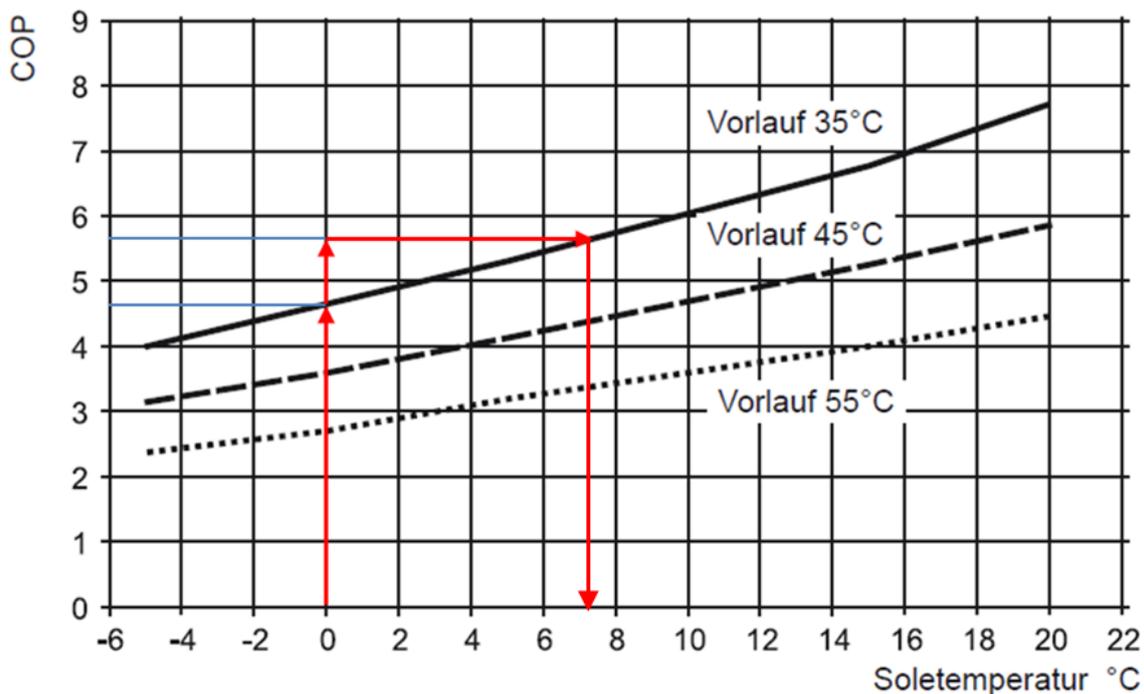


Abbildung 4-2 Abhängigkeit des COP einer Wärmepumpe von der Quellentemperatur (Soletemperatur) bei verschiedenen Vorlauftemperaturen

4.2.2 Verzicht auf großflächige Erdwärmetauscher

Beim Einsatz von Sole-Wärmepumpen, die das Erdreich als Wärmequellen verwenden, müssen Erdbohrungen oder Grabungen gemacht werden, die sehr teuer sind. Wird die Solaranlage als zusätzliche Wärmequelle verwendet, kann die eigentliche Wärmequelle der Wärmepumpe weniger groß dimensioniert werden, und damit Investitionskosten gespart werden. (Drück, 2010)

4.2.3 Aktive oder passive Regeneration

Wenn die Möglichkeit hydraulisch vorgesehen ist, das Erdreich durch Aktivieren eines Kreislaufs mit solarer Wärme zu erwärmen, spricht man von aktiver Regeneration. Das ist vor allem in den Sommermonaten interessant, wenn sehr viel Sonnenstrahlung auf den Kollektor eintrifft, und diese dann leicht wegen Stagnation überhitzen. Die Stagnation kann durch Abführen der Wärme in das Erdreich vermieden werden.

Aber allein die Installation einer Solaranlage trägt dazu bei, weniger Wärme aus dem Erdreich abziehen zu müssen. Diese „Schonung“ des Erdreichs wird als passive Regeneration bezeichnet.

4.3 Auftretende Probleme

Es treten aber nicht nur Vorteile bei der Kombination von Wärmepumpen und Solaranlagen auf. In den folgenden Abschnitten wird näher darauf eingegangen, warum sich die beiden Wärmeerzeuger auch negativ beeinflussen können.

4.3.1 Unterschiedliche Betriebspunkte

Die Betriebspunkte einer Wärmepumpenquelle und eines Solarkollektors liegen im Normalfall um 50 – 90 K auseinander. Bei der Überschneidung der Betriebstemperaturbereiche gibt es daher unvermeidliche Probleme. Die **Probleme seitens des Kollektors** wegen der geringen Temperatur der Solarflüssigkeit sind folgende:

- Tiefere Temperatur hat höhere Viskosität zur Folge. Das verursacht einen höheren Druckverlust im Solarkreislauf und führt damit zu einem größeren Energieverbrauch der Solarpumpe
- Unterschreitet die Temperatur der Solarflüssigkeit die Umgebungslufttemperatur des Kollektors, kann es zu Ausscheidung von Kondenswasser im Kollektor kommen. Wird die Dämmung des Kollektors durchfeuchtet, hat das eine erhebliche Reduktion der Leistungsfähigkeit des Kollektors zur Folge

Um den Druckverlust in Grenzen zu halten, kann eine andere Solarflüssigkeit verwendet werden. Bei der Recherche wurde kein derartiger Lösungsansatz eines Herstellers gefunden. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Solarpumpe keinen allzu großen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch eines Systems ausmacht, und sich daher eine Entwicklungsarbeit nicht lohnt

Um dem Ausscheiden von Kondenswasser entgegenzuwirken gibt es mehrere Ansätze. Sogenannte Hybridkollektoren können die Außenluft durch den Kollektor saugen und dabei der Luft Energie entziehen. Gleichzeitig wird durch die Belüftung das angefallene Wasser abtransportiert (Neukomm, et al., 2010). Andere Kollektoren haben Einrichtungen die das Abfließen des Kondensats ermöglichen. Sollen herkömmliche Kollektoren zum Einsatz

kommen, muss eine Mindesttemperatur der Solarflüssigkeit über die Regelung gewährleistet werden.

Erfahrungen und Messdaten aus Feldtestmessungen mit Solar-Wärmepumpensystemen mit verglasten Kollektoren unter Praxisbedingungen sind derzeit aber nicht in nennenswertem Umfang verfügbar. Eine Markterhebung der Fachhochschule Ingolstadt zeigt beispielsweise, dass die Kollektoreinsatzbedingungen für marktverfügbare Solarwärmepumpensysteme nur bedingt bekannt sind (Müller, et al., 2008)

Seitens der **Wärmepumpe** kann es durch eine starke Erhöhung der Quelltemperatur einer Wärmepumpe zu einer Hochdruckstörung im Verdampfer kommen. Die Wärmepumpe wird durch eine Selbstsicherung gestoppt und kann das Gebäude nicht mehr mit Energie versorgen. Erst wenn die Temperatur unter den festgesetzten Grenzwert fällt, kann die Wärmepumpe wieder arbeiten.

Solche hohen Temperaturen können beispielsweise beim Einsatz eines Pufferspeichers oder eines Wärmetauscher als Schnittstelle zwischen Solarkreislauf und Solekreislauf auftreten. Wie auch bei der Mindesttemperaturregelung der Solarflüssigkeit kann auch der Soleeintritt an der Wärmepumpe über die Regelung vor überhöhter Temperatur geschützt werden. Beispielsweise kann in den Solekreis eine Beimischschaltung verbaut werden. Diese mischt den von der Wärmepumpe abgekühlten Rücklauf mit dem Vorlauf, um eine verträgliche Temperatur für den Verdampfer der Wärmepumpe zu erzeugen.

4.3.2 Erhöhter Regelungsaufwand

Oft werden bei dem „parallelen“ Einsatz von einer Solaranlage und einer Wärmepumpe (siehe Absatz 4.4.1) zwei Regelungen verwendet, die nicht miteinander kommunizieren. Das ist auch nicht zwingend notwendig und bringt nur wenig Vorteile mit sich, die eine Neuinstallation der Regelung meistens nicht rechtfertigen.

Die Interaktion dieser beiden Systeme, wie es in Absatz 4.4.3 beschrieben ist, erfordert aber eine einheitliche Regelung, die in der Lage sein sollte, den effizientesten Betriebsmodus für jeden Betriebszustand finden zu können. Das ist aber alles andere als trivial und ist stark von der Art der hydraulischen Einbindung abhängig. Solche Regelungen erfordern viel Entwicklungsaufwand und sind daher teurer. Nicht zu vernachlässigen ist die erschwerte Installation und Grundeinstellung für die Heizungsbauer.

4.4 Gliederung/Klassifizierung von Systemkombinationen

Mittlerweile ist eine nennenswerte Anzahl von Solar- Wärmepumpensystemen am Markt erhältlich. Die Systeme unterscheiden sich aber in ihren Konzepten, Aufbau und Funktion teilweise erheblich. Die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe verursacht in der Regel einen erhöhten Installations- und Regelaufwand. Dadurch ergeben sich komplexe Heizungssysteme, die starke Abweichungen der Einsatzbedingungen von Komponenten einer herkömmlichen Solaranlage verursachen können (Müller, et al., 2008).

In den folgenden Absätzen ist eine Einteilung der Systeme nach Trinkl (Haller, et al., 2010) vorgenommen worden. Dabei wurden Systeme, die am Markt angeboten werden, der Klassifizierung zugeteilt. Die Anlagen der Hersteller sind mit einer kurzen Anleitung im Anhang zu finden.

4.4.1 Parallele Systeme

Der Wärmebedarf wird zunächst solar abgedeckt. Erst wenn die Wärmebereitung durch die Solarkollektoren nicht mehr ausreicht, wird die Wärmepumpe zur Bereitstellung der Wärme verwendet. Dabei interagieren die beiden Systeme aber nicht. Anstatt der Wärmepumpe könnte jede andere Komponente zur Wärmeerzeugung verwendet werden.

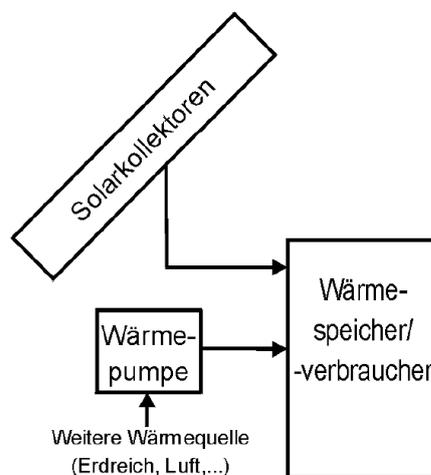


Abbildung 4-3 Systemkonfiguration eines parallelen Solar-Wärmepumpensystems (Müller, et al., 2008)

Dieses System ist das am meisten verbreitete, in dem zugleich eine Wärmepumpe und eine Solaranlage zur Deckung des Wärmebedarfs eines Gebäudes beitragen. Dabei sind die Kreisläufe der Wärmepumpe und der Solaranlage getrennt und beeinflussen sich nicht gegenseitig. Regelungstechnisch wäre es aber durchaus sinnvoll einen „solaren Kesselstop“ zu programmieren. Dieser soll verhindern, dass während der solaren Beladung die Wärmepumpe angefordert wird. Erst wenn absehbar ist, dass die Sonnenenergie nicht ausreicht, um den Energiebedarf zu decken, wird die Wärmepumpe gestartet.

Da ein Großteil des Energiebedarfs in den Sommermonaten solar gedeckt werden kann, wird die Entzugsenergie der Erdsonde oder des Erdkollektors reduziert. Es können so die Investitionskosten der Erdkollektoren reduziert werden. Eine aktive Regeneration des Erdreichs ist aber nicht möglich.

Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 zeigen zwei Systeme, die mit dem parallelen Prinzip aufgebaut sind. Das System in Abbildung 4-4 zeigt eine Wärmepumpe, die ausgelegt worden ist um den Heizungsbedarf des Gebäudes zu decken. In Abbildung 4-5 dient die Wärmepumpe lediglich als Backup, da der Energiebedarf hauptsächlich von der Solaranlage gedeckt wird

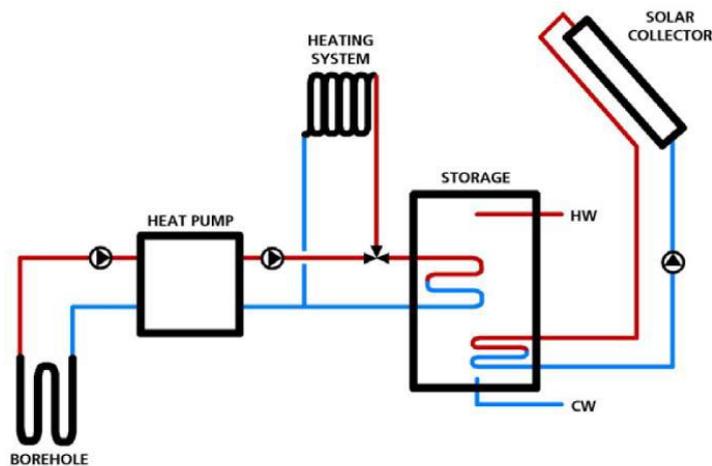


Abbildung 4-4 Wärmepumpe und Solaranlage arbeiten unabhängig voneinander (Miara, 2010)

Hersteller: Viessmann, Vaillant, Nibe, Bosch Thermotechnik

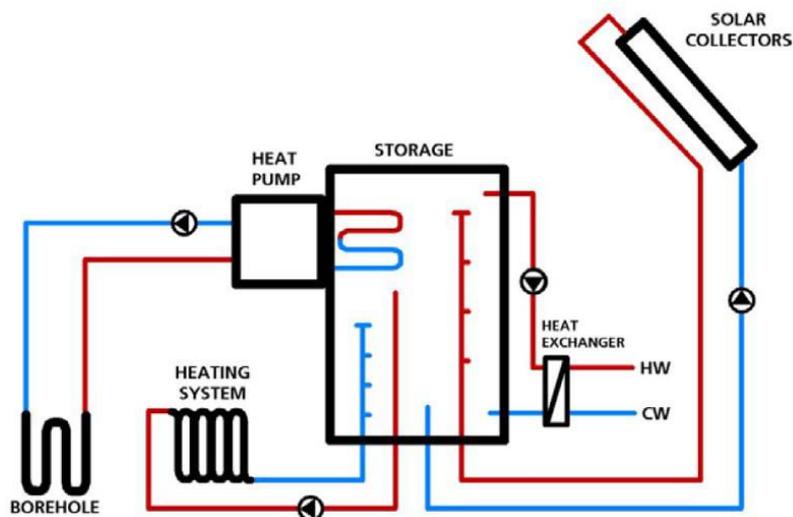


Abbildung 4-5 Kombination mit WP als Backup (Miara, 2010) **Hersteller:** Solvis

4.4.2 Serielle Systeme

Bei diesen Systemen wird die durch die Solarkollektoren erzeugte Energie als Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet. Es besteht keine Möglichkeit, die Solarenergie direkt zu nutzen. Weitergehend wird unterschieden, ob die Solarenergie zuerst in einen Pufferspeicher oder direkt zur Wärmepumpe geführt wird. Dieser Puffer kann zum einen ein mit Flüssigkeit gefüllter Speicher im Heizungsraum oder aber auch über Erdkollektoren beladenes Erdreich sein.

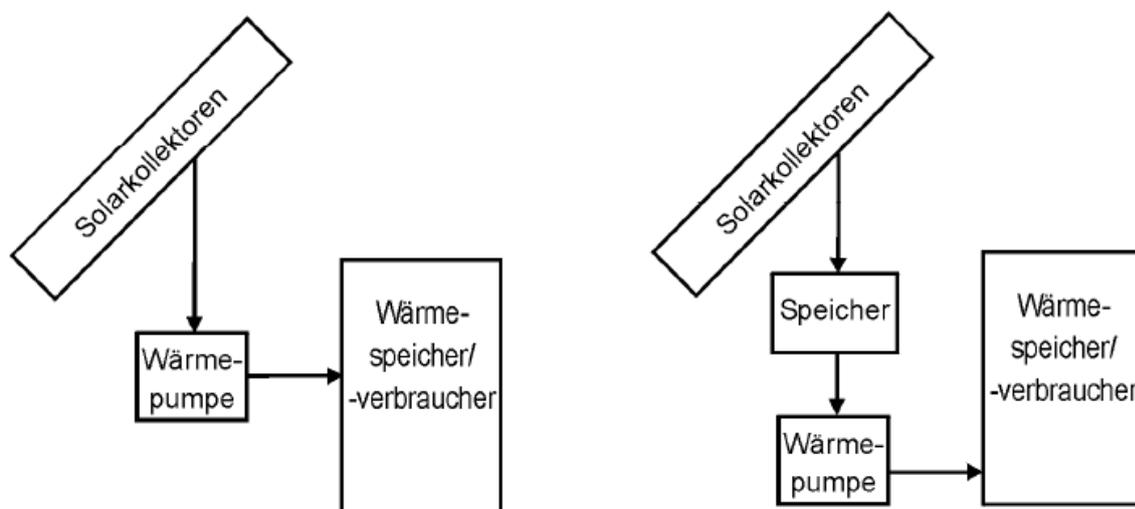


Abbildung 4-6 mögliche Systemkonfigurationen für serielle Solar-Wärmepumpensysteme (Müller, et al., 2008)

Am Markt befinden sich aber nur wenige Systeme, die eine reine serielle Anbindung anbieten. Bei den meisten Systemen wird auch die Möglichkeit der direkten solaren Beladung des Speichers genutzt (Kombiniertes System Siehe Absatz 4.4.3).

4.4.2.1 Unabgedeckte Solarkollektoren

Rheinzink (Zienterra, 2008) benutzt zur Realisierung eines seriellen Systems unabgedeckte Kollektoren. Diese Absorber wandeln die Sonneneinstrahlung in Wärme um und geben sie an ein Rohrleitungssystem ab. Zum Einsatz kommen Niedertemperaturabsorber, die bei Temperaturen unter 40 °C optimal arbeiteten. Die Wärmepumpe hebt das niedrige Temperaturniveau der Absorber auf ein brauchbares an. Damit können dann die verschiedenen Verbraucher, wie z.B. ein Heizkreis oder ein Verbraucher versorgt werden. Der Vorteil bei der Benutzung von unabgedeckten Absorbern ist, dass sie einen höheren Wirkungsgrad bei geringer Temperaturspreizung zwischen Absorbtemperatur und Außenlufttemperatur haben als herkömmliche Kollektoren. Das in Absatz 4.3.1 angesprochene Problem mit Kondenswasserbildung bei Unterschreitung der Solarflüssigkeitstemperatur unter die Außentemperatur ist bei unabgedeckten Absorbern

vernachlässigbar. Das Wasser kann keine Bauteile beschädigen und trocknet an freier Umgebung gut auf, bzw. kann leicht abfließen. In dem in Abbildung 4-7 gezeigten System kann die Wärmepumpe zusätzlich noch über eine Erdsonde Erdwärme als Wärmequelle verwenden. Diese kann bei Überschuss von solarer Wärme regeneriert werden.

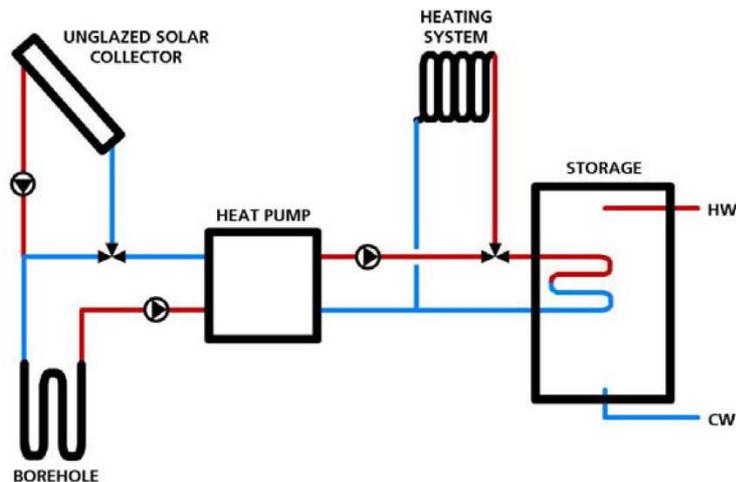


Abbildung 4-7 Solarwärme wird indirekt über eine Wärmepumpe in das System eingebracht (Miara, 2010)

Hersteller: Rheinzink (Unverglaste Solarkollektoren zur Erhöhung der Vorlauftemperatur), MEFA Energy Systems (Kömmelt Peter/Solarthermie Wärmepumpe)

4.4.3 Kombinierte Systeme

Die durch die Solarkollektoren erzeugte Wärme wird je nach Temperaturniveau entweder direkt, oder über die Wärmepumpe in den Speicher oder zum Verbraucher gebracht. Dadurch ergeben sich grundsätzlich drei mögliche Systemkonfigurationen (siehe Abbildung 4-8) Wie im Absatz 4.4.2 schon beschrieben, kann auch hier ein Pufferspeicher zwischen Wärmepumpe und Solarkollektor geschaltet werden. Er kann das Angebot der solaren Energie bei Bedarf der Wärmepumpe als Quelle zur Verfügung stellen. Durch die tiefen Temperaturen in diesem Puffer werden die Solarkollektoren auch außerhalb des üblichen Betriebsbereichs betrieben. Allerdings ist darauf zu achten, dass bei Unterschreiten der Solarflüssigkeitstemperatur unter Umgebungstemperatur Kondenswasser am Absorber abscheidet (siehe Absatz 4.3.1).

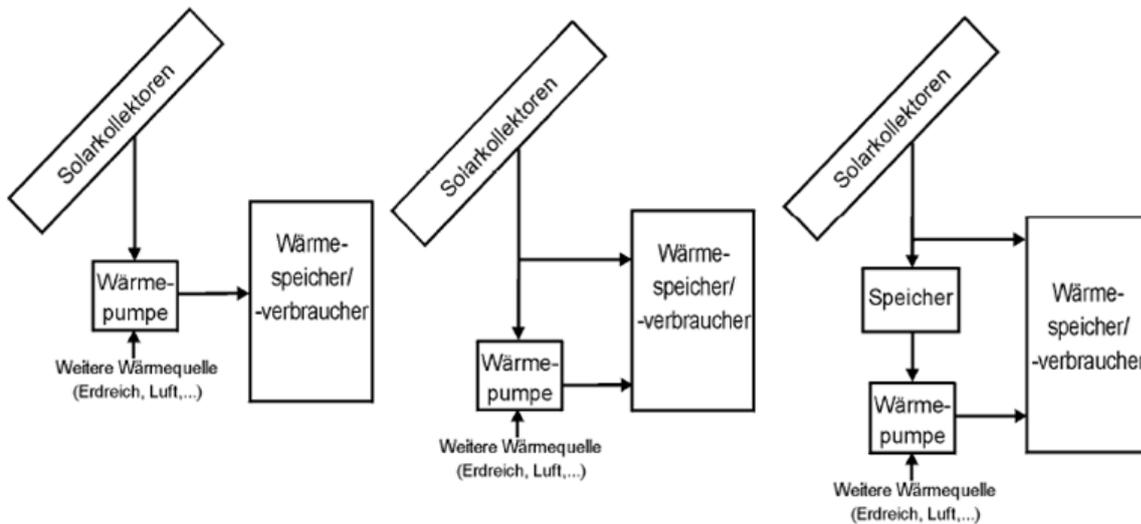


Abbildung 4-8 mögliche Systemkonfiguration für parallele Solar-Wärmepumpensysteme (Müller, et al., 2008)

4.4.3.1 Aktive Regeneration

Primär wird die Solarwärme direkt genutzt. Die Wärmepumpe entzieht bei Bedarf dem Erdreich Energie. Der Überschuss an Solarenergie im Sommer wird dazu verwendet, das Erdreich zu erwärmen und trägt damit zu einer besseren und schnelleren Regeneration bei. Bei geeigneter hydraulischer Verschaltung kann die Solarenergie auch dazu verwendet werden, die Wärmepumpenquellentemperatur direkt anzuheben.

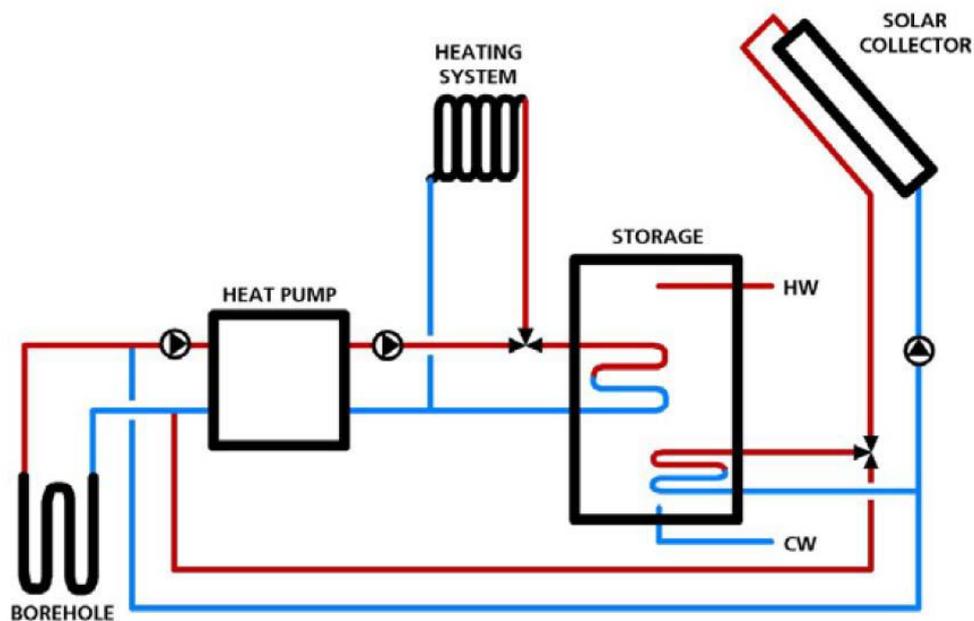


Abbildung 4-9 Kombiniertes System mit der Möglichkeit zur aktiven Regeneration des Erdreichs (Miara, 2010)

Hersteller: IDM, Immosolar, Schüco, Roth

Ein großer Vorteil dieser Systeme ist, dass die Stagnation durch Erdreichregeneration verhindert werden kann.

Beim Betrieb mit der Erdreichregeneration wird ein Teil der dem Erdreich zugeführten solaren Energie mit dem Grundwasser oder über Wärmeleitung entweichen und daher nicht mehr in der Heizperiode zur Verfügung stehen. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Boden wegen des solaren Wärmeeintrags im Sommer austrocknen kann. Mit einem geringeren Feuchteanteil nimmt auch die Wärmespeicherfähigkeit des Erdreichs ab.

4.4.3.2 Großer Pufferspeicher

Dieses System arbeitet mit dem gleichen Prinzip wie jenes der aktiven Regeneration (Absatz 4.4.3.1). Der Unterschied besteht nur darin, dass bei überschüssiger oder nicht nutzbarer Solarwärme ein Puffer, und nicht das Erdreich erwärmt wird. Die Wärmepumpe nutzt diesen Puffer um bei Bedarf die Verbraucher versorgen zu können. Wenn die Energie im Puffer nicht mehr ausreicht, kann alternativ die Wärme auch aus dem Erdreich bezogen werden.

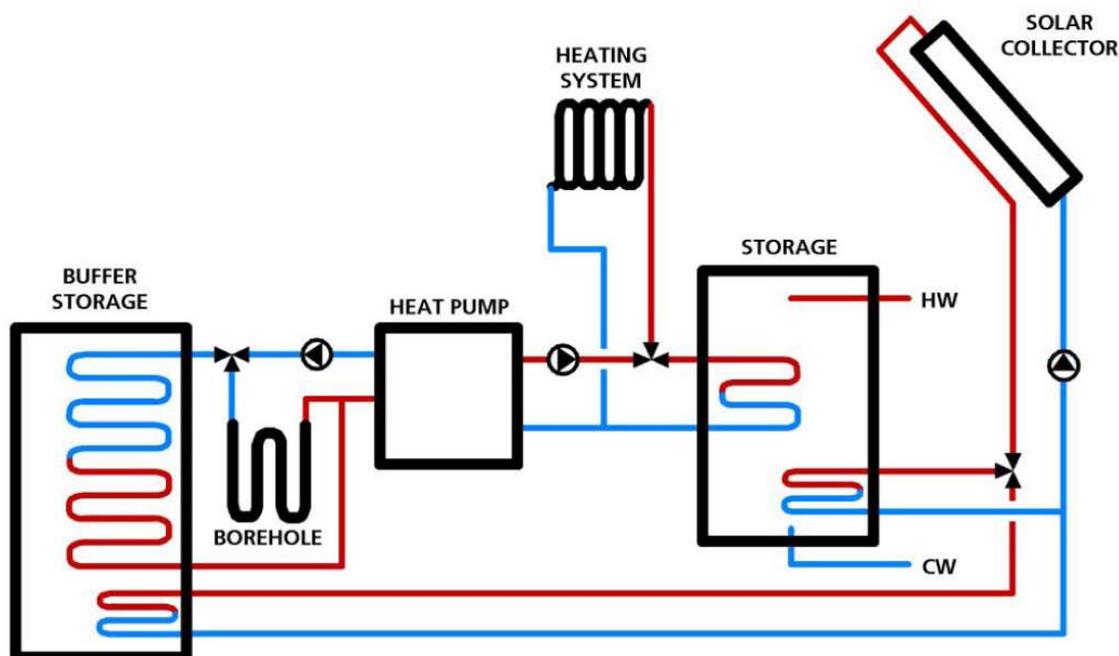


Abbildung 4-10 solarbeladener Pufferspeicher dient als Wärmequelle für Wärmepumpe (Miara, 2010)

Hersteller: Chemowerk- CEMO, Soltex, Thermosolar

Dieses System hat grundsätzlich die gleichen Vorteile wie eine aktive Regeneration. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass Stagnation im Sommer auftritt, da die Speicher in ihrer Kapazität begrenzt sind. In diesem Fall könnte der Wärmepumpenpuffer über die Solepumpe der Wärmepumpe in das Erdreich entladen werden. So entsteht wieder Speicherkapazität für die solare Wärme.

Nachteilig sind vor allem der große Platzbedarf und die hohen Investitionskosten für Speicher und Regelung. In vielen Systemen, die am Markt angeboten werden, ist eine aktive Regeneration nicht vorgesehen.

4.4.3.3 Luft- Wärmepumpe mit solarer Unterstützung

Um Warmwasser und Heizungswärme zu erzeugen, wird primär Solarwärme verwendet. Reicht die Energie nicht aus, um nutzbare Wärme direkt mit Solar zu erzeugen, wird die Luftwärmepumpe durch die Solarwärme unterstützt. Dazu werden teilweise Verdampfer verwendet, die sowohl mit Sole als auch mit Luft erwärmt werden können. Die Solarwärme kann dann auch zum Enteisen des Verdampfer-Wärmetauschers verwendet werden. Wenn keine Solarwärme zur Verfügung steht, kann die Wärmepumpe nur die Umgebungsluft als Wärmequelle nutzen.

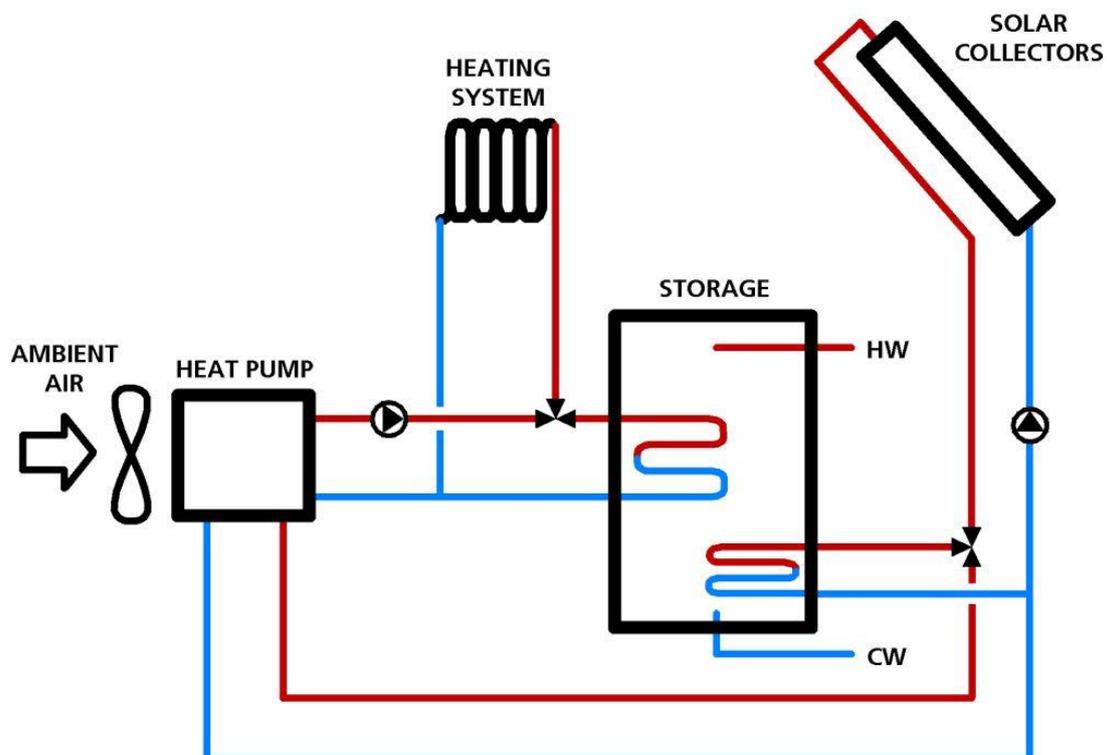


Abbildung 4-11 Luftwärmepumpe mit solarer Vorwärmung (Miara, 2010)

Hersteller: Solution, ratiotherm, alpha-innotec, Sonnenkraft

Eine Luftwärmepumpe erfordert keine Investition um diese Wärmequelle nutzen zu können, sondern ist überall vorhanden. Die stark schwankenden und vor allem niedrigen Temperaturen im Winter machen aber einen elektrischen Heizstab als Backup notwendig und führen im Vergleich zu Wärmepumpen mit Erdreichwärmequelle zu niedrigen Systemarbeitszahlen.

4.4.3.4 Eisspeicher/ Latentspeicher

Durch den Einsatz eines Latentwärmespeichers anstatt des Niedertemperaturspeichers kann die Wärme, die bei der Umwandlung eines flüssigen Mediums in den festen Aggregatzustand entsteht, genutzt werden. Diese Umwandlung geschieht bei konstanter Temperatur, was für die Effizienz der Wärmepumpe ein großer Vorteil ist. Das Temperaturniveau der Phasenumwandlung kann durch den Einsatz verschiedener Speichermedien beeinflusst werden. In den meisten am Markt angebotenen Systemen wird Wasser als Medium in einem drucklosem Speicher verwendet. Die Umwandlung findet demnach bei 0 °C statt. Die latente (versteckte) Wärme beträgt bei der Umwandlung von Wasser zu Eis 334 kJ/kg.

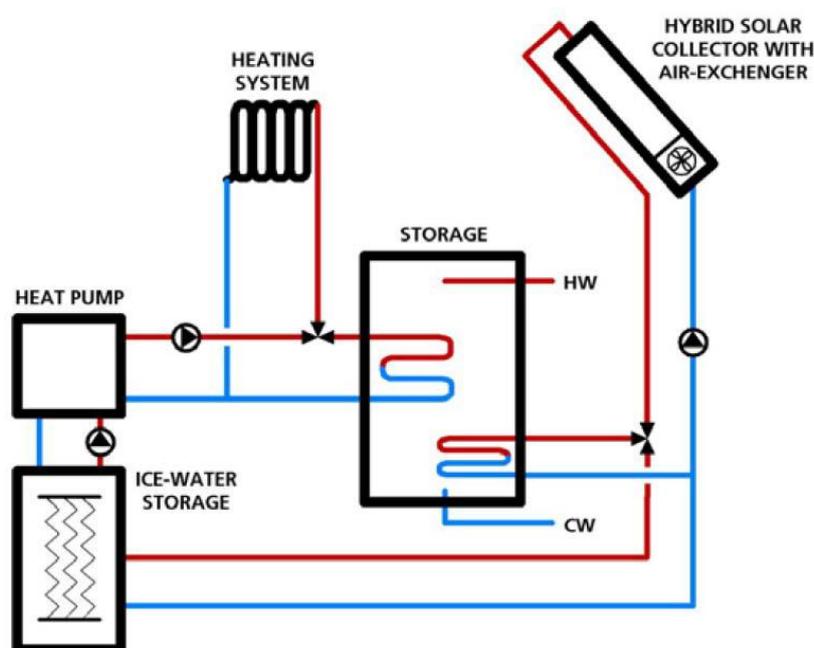


Abbildung 4-12 Latentspeicher als Wärmepumpenquelle (Miara, 2010)

Hersteller: Consolar, WESTFA, Aquasol, Terra Sunenergy

Auch bei diesem System besteht die Gefahr der Kondenswasserbildung im Kollektor. Einige Hersteller (WESTFA, Consolar) verwenden Hybridkollektoren, um auch die Wärmeenergie in der Außenluft an die Solarflüssigkeit übertragen zu können. Durch die Belüftung wird das Wasser im Kollektor abtransportiert, oder es kann über die Lüftungsöffnungen abfließen. Bei Bedarf entzieht die Wärmepumpe dem Latentspeicher Energie, bis das Medium im Speicher gefriert und unterkühlt den Inhalt, solange ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist.

Wie auch bei einer Luftwärmepumpe ist auch bei diesem System kein großer finanzieller Aufwand zur Erschließung der Wärmequelle nötig. Vorausgesetzt dass der solare Ertrag einen Einsatz rechtfertigt, kann es überall aufgebaut werden. Wegen der geringen Temperaturen des Mediums im Latentspeicher können Verluste an den Speicherraum ausgeschlossen werden. Es sind sogar eher Wärmegewinne durch die Aufstellungsraumwärme zu erwarten, der dabei allerdings auskühlt.

Ein Problem, dass der Einsatz eines Latentspeichers mit sich bringt, ist, dass der Phasenübergang des Mediums am Wärmetauscher beginnt. Die Eisbildung an der Wärmetauscherwendel bewirkt eine thermische Isolation, weshalb sich der Wärmeübergang vom Wärmetauscher hin zum noch flüssigen Medium verschlechtert. Wie bei allen anderen kombinierten Systemen muss auch hier die Möglichkeit einer Kondenswasserbildung berücksichtigt werden.

4.5 Forschungsberichte und Studienarbeiten

4.5.1 Theoretische Chancen der Effizienzverbesserung

M.Haller (Haller, et al., 2011) hat bei Systemen, die die Solarwärme direkt in einen Puffer zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung liefern, oder die Kollektorwärme der Verdampferseite einer Wärmepumpe zu Verfügung stellen können, untersucht, ab wann eine Umschaltung sinnvoll ist. Das Ziel ist eine Regelung zu entwerfen die entscheiden kann, welcher Betrieb zu einem gewissen Zeitpunkt den Systemnutzungsgrad erhöht.

In Abbildung 4-13 wird die hydraulische Verschaltung beider Systeme veranschaulicht. Im Bild links wird die Kollektorwärme direkt in den Puffer geleitet. Das rechte Bild zeigt das System, bei dem die Kollektorwärme indirekt als Wärmequelle einer Wärmepumpe verwendet wird. Die Wärmepumpe hat allerdings die Möglichkeit, jederzeit eine andere Wärmequelle zum Verdampfen des Kältemittels zu verwenden.

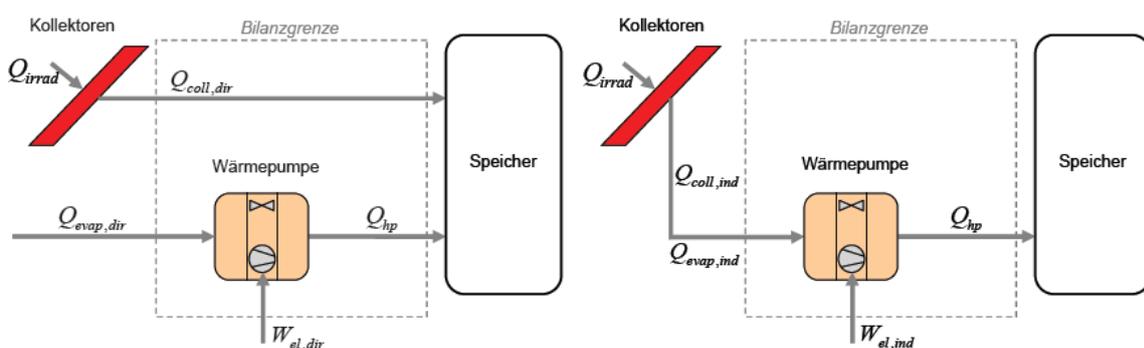


Abbildung 4-13 Betriebsvarianten von Solar-Wärmepumpensystemen, links direkte, rechts indirekte (d.h. über Wärmepumpe) Einbringung der Kollektorwärme in das System (Haller, et al., 2011)

Um beurteilen zu können, wann die Kollektorwärme direkt oder indirekt über die Wärmepumpe genutzt werden soll, muss eine aussagekräftige Kenngröße definiert werden. Wie im Abschnitt 3.2 beschrieben ist mit der System-Arbeitszahl das Verhältnis der Wärmemenge, die vom System zur Verfügung gestellt wird, zur dafür notwendigen elektrischen Arbeit in einem bestimmten Zeitraum dargestellt. (Gleichung 4-1)

$$AZ_{sys} = \frac{Q_{th,sys}}{W_{el,sys}} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Eine indirekte Nutzung der Kollektorwärme zur Steigerung der Effizienz ist nur dann sinnvoll wenn:

$$AZ_{sys,ind} > AZ_{sys,dir} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Für die weitere Betrachtung werden folgende Vereinfachungen gemacht.

- Bei beiden Betriebsmodi wird insgesamt gleich viel Energie bei gleichem Temperaturniveau in das System eingebracht
- In beiden Betriebsmodi wird gleich viel elektrische Leistung für den Kollektorkreis benötigt

Mit diesen Vereinfachungen und den Grundlagen aus dem Kapiteln 2 und 3 können folgende Bedingung aufgestellt werden

$$\frac{\Delta COP_{hp}}{(COP_{hp,dir} - 1)} * \frac{\Delta \eta_{coll}}{\eta_{coll,dir}} > 1 \quad \text{Gleichung 4-3}$$

mit

$$\Delta COP_{hp} = COP_{hp,ind} - COP_{hp,dir} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

und

$$\Delta \eta_{coll} = \eta_{coll,ind} - \eta_{coll,dir} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

Für verschiedene $COP_{hp,dir}$ der Wärmepumpe ergeben sich aus dieser Beziehung Kurven, die in Abbildung 4-14 dargestellt sind.

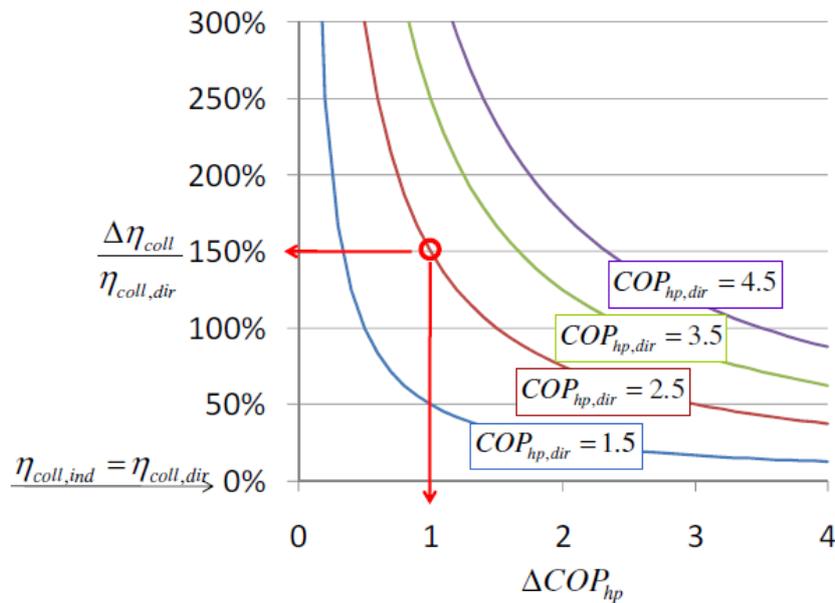


Abbildung 4-14 Grenzlina für eine vorteilhafte indirekte Nutzung der Kollektorwärme für verschiedene $COP_{hp,ind}$ (Haller, et al., 2011)

Angenommen der COP im direkten Betrieb wäre 2,5. Damit die indirekte Nutzung der Kollektorwärme die Arbeitszahl des Systems (AZ_{sys}) verbessert, müsste z.B. der $COP_{hp,ind}$ gegenüber $COP_{hp,dir}$ um 1, und gleichzeitig der Kollektoreffizienzgrad ($\eta_{coll,ind}$) um 150% steigen.

Aus Gleichung 4-3 und Gleichung 2-10 kann eine kritische Größe für die Einstrahlung bestimmt werden, unterhalb der die indirekte Nutzung der Kollektorwärme sinnvoll ist.

$$I_{g,limit} = \frac{\Delta COP_{hp}}{(COP_{hp,dir} - 1)} * \frac{x_{dir} - x_{ind}}{\eta_0} + \frac{x_{dir}}{\eta_0} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

wobei

$$x = c_1 * \Delta t_m + c_2 * \Delta t_m^2 \quad \text{Gleichung 4-7}$$

die Verluste des Kollektors darstellen. Diese sind abhängig von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung

$$\Delta t_m = \frac{(t_{abs,ein} + t_{abs,aus})}{2} - t_a \quad \text{Gleichung 4-8}$$

In seinem Bericht hat M. Haller diese Grundlagen auf den Fall einer Luft-Wärmepumpe angewandt. Für diesen Fall gilt dass die Umgebungsluft als alternative Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet wird, und dass eine Möglichkeit zum längerfristigen Speichern der Solarwärme **vor** der Nutzung für den Verdampfer nicht möglich ist.

Da sowohl die Leistungszahl der Luftwärmepumpe sowie der Wirkungsgrad des Kollektors zum einen von der Außentemperatur und zum anderen von den Temperaturanforderungen von der Heizung abhängig sind, kann die kritische Einstrahlung ($I_{g,limit}$) als Funktion dieser Größen dargestellt werden.

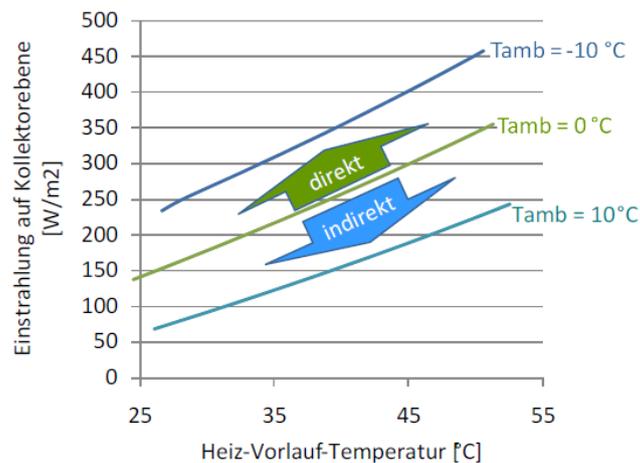


Abbildung 4-15 Werte für die Einstrahlung unter derer sich die indirekte Nutzung von Kollektorwärme für das untersuchte System positiv auswirkt. (Haller, et al., 2011)

Es geht deutlich hervor, dass die „Grenz“- Einstrahlung ($I_{g,limit}$) sich gegen größere Werte verschiebt, je höher die Anforderungen der Heiztemperatur liegen und je tiefer die Umgebungstemperaturen sind. Das bedeutet, dass die indirekte Nutzung der Kollektorwärme vor allem für Systeme mit ungünstigen Bedingungen für Solarsysteme und Wärmepumpen interessant sein könnte.

4.5.2 System mit Niedertemperaturspeicher

In einer Forschung am Institut für Wärmetechnik an der Universität in Stuttgart hat Frau Barbara Mette (Mette, 2010) eine Forschungsarbeit durchgeführt die, wie auch diese Arbeit, ein solares Wärmepumpensystem mit Pufferspeicher als Wärmepumpenquelle untersucht. Sie simulierte mit dem Simulationsprogramm TRNSYS ein System, das, wie in dieser Arbeit auch, einen Speicher zur Anhebung der Quellentemperatur bzw. als alternative Quelle verwendet. Dieser Speicher wird mit überschüssiger solarthermischer Energie aufgeladen. Abbildung 4-16 zeigt den schematischen Aufbau der Anlage.

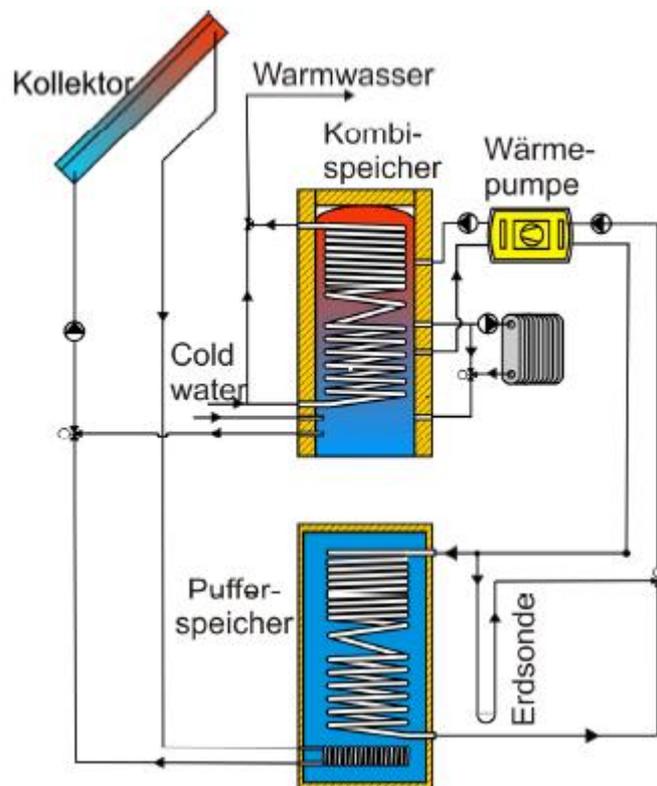


Abbildung 4-16 Systemschaubild (Mette, 2010)

Die Eckdaten des simulierten Systems sind:

- Einfamilienhaus mit 128 m² Wohnfläche in Würzburg
- 12 m² Kollektorfläche mit Ausrichtung Süd und einer Neigung von 45°
- Gesamtwärmebedarf: 12680 kWh/a
- Heizwärmebedarf 9090 kWh/a (71kWh/m² a)
Heizungsregelung witterungsgeführt mit maximalen Vor-/Rücklauftemperaturen von 35/25°C
- Trinkwasserwärmebedarf: 2945 kWh/a (200l/d 45°C)
- Wärmeverluste des Speichers einer entsprechenden „konventionellen“ Anlage: 645 kWh/a

- Wärmequellentemperatur der Wärmepumpe zwischen 7°C und 20°C je nach Jahreszeit
- Leistungszahlen von 4,3 bzw. 4,1 nach EN 14511 im Betriebspunkt B0/W35

Aufgrund der Angabe von zwei COPs für die Wärmepumpe, wurde Frau Mette um weitere Informationen gebeten. Die Systeme wurden mit unterschiedlichen Wärmepumpenleistungszahlen simuliert. Das System, in dem die Wärmepumpe und die Solaranlage parallel arbeiten wurde mit einer Leistungszahl der Wärmepumpe von 4,1 (B0/W35) simuliert. Das System mit der interagierenden Solar-Wärmepumpenkombination wurde mit der Leistungszahl der Wärmepumpe von 4,3 (B0/W35) simuliert. Diese Voraussetzungen wurden von der Firma gewünscht, die den Auftrag gegeben hatte

In der Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Untersuchung tabellarisch dargestellt. Die Abkürzungen, die bei der Auswertung verwendet worden sind, haben folgende Bedeutung:

WP	Anlage die nur durch eine Wärmepumpe betrieben wird
REF	Referenzhaus
WP +Solar, Int	Wärmepumpe und Solarthermieanlage interagieren über einen Puffer
WP +Solar, NonInt	Wärmepumpe und Solarthermieanlage arbeiten parallel. (keine solare Quellentemperaturerhebung)

Tabelle 4-1 Simulationsergebnisse der drei untersuchten Anlagenvarianten (Mette, 2010)

Beschreibung	Einheit	Ref	WP	WP + Solar, Int	WP + Solar, Non-int
Wärmebedarf inkl. Wärmeverluste Speicher	[kWh/a]	12 680	12 920	13 230	13 004
Wärme von Wärmepumpe	[kWh/a]	-	12 920	9 814	9319
Wärme von Solaranlage	[kWh/a]	-	-	3 416	3685
Zusatzwärmebedarf	[kWh/a]	12 680	-	-	-
Strombedarf	[kWh/a]	-	3 257	2 229	2459
JAZ der Wärmepumpe	[-]	-	4,0	4,4	3,8
JAZ des Heizsystems*	[-]	-	3,9	5,7	5,2

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass eine Einsparung des elektrischen Energiebedarfs von 32% zwischen einer Anlage, die nur mit einer Wärmepumpe betrieben wird und einer Kombinierten Anlage. Interessanter ist allerdings viel mehr die Einsparung der beiden Systeme, die eine Solaranlage besitzen. Diese Systeme werden „WP + Solar, Int“ bzw. „WP + Solar, Nonint“ genannt. Hier ergibt sich eine Einsparung von **9,3%**, wenn man „WP + Solar, Nonint“ als Referenz annimmt.

4.5.3 Erdreich Regeneration

Die Firma Schüco aus Bielefeld hat auch den Trend zur Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe erkannt und daher eine Studie durchgeführt, die das Potential der Erdreichregeneration mittels solarthermischer Energie aufzeigen soll (TGA Fachplaner, 2010). Dieser Test, der auch mit TRNSYS durchgeführt wurde, fiel nach aufwendiger Optimierung der Regelstrategien laut Schüco so positiv aus, dass sie einen Feldtestversuch mit mehreren Anlagen im Jahr 2007 starteten. Die Eckdaten des simulierten Systems entsprechen den Standards eines Niedrigenergiehauses nach EnEV-2009, und sind folgende:

- 10 m² Kollektorfläche
- 80 m Erdsondenlänge
- 750 l Solar-Kombispeicher

Als erfolgversprechendstes System kristallisierte sich eine Erdreich-Regeneration heraus. Abbildung 4-17 zeigt prinzipiell den Aufbau dieser Anlage.

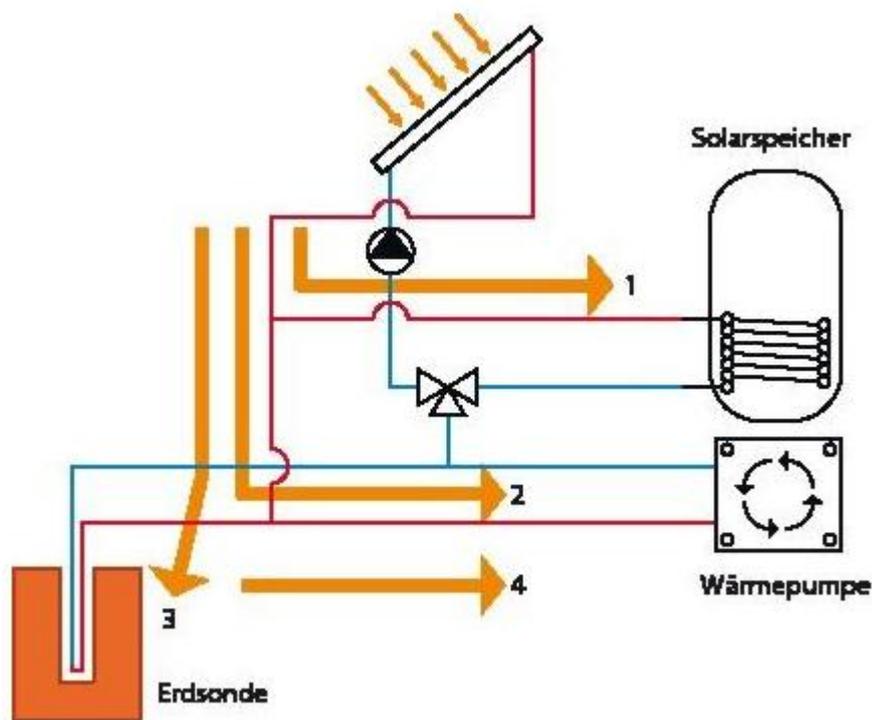


Abbildung 4-17 Systemschaltbild der Schüco-Anlage (TGA Fachplaner, 2010)

Schüco gibt eine Verbesserung des solaren Ertrages von 10% an, und erreicht daher Solarerträge von 600 kWh/m²a. Die Kollektortemperatur soll bei einer solaren Einstrahlung über 250 W/m² zwischen 25°C und 110°C liegen. Das reicht meistens aus, um den Speicher direkt zu beladen. Bei Einstrahlungen unterhalb der Grenze von 250 W/m² reicht die Kollektortemperatur aber immer noch aus um das Erdreich zu regenerieren.

Aus diesen Angaben lässt sich erkennen, dass die Regelung der Umschaltung von der direkten/indirekten Nutzung der Solarwärme von der Einstrahlung auf die Kollektorfläche abhängig gemacht wurde. Um den Pumpenaufwand zur Regeneration in Grenzen zu halten und solare Verluste im Erdreich zu vermeiden, wurde die Maximaltemperatur für das Erdreich auf 12 °C begrenzt.

Die Fa. Schüco entwickelte einen eigenen Solarkollektor, der Bohrungen zum Auslass des Kondensats enthält, um das Problem mit dem Kondensat bei geringen Rücklauftemperaturen in den Griff zu bekommen. Zusätzlich ist die mineralische Wolle zur Dämmung des Kollektors imprägniert. Ein Sammelrohrmäander soll auch bei niedrigsten Temperaturen nur geringe Druckverluste verursachen.

Die Ergebnisse des Feldtest bestätigten laut Schüco die Simulation. In Abbildung 4-18 ist der Temperaturverlauf des Erdreichs in verschiedenen Tiefen über die Dauer des Feldtest aufgetragen. Die Abnahme der Minimaltemperatur über mehrere Jahre, zeigt den typischen Verlauf der durchschnittlichen Temperatur einer neu installierten Erdsonde ohne Erdreichregeneration (Abbildung 3-6). Auffällig ist der Anstieg der Temperatur in den Sommermonaten im Vergleich zum jeweiligen Vorjahr. D.h. die Differenz der maximalen Temperaturen im Sommer und den minimalen im Winter nimmt zu.

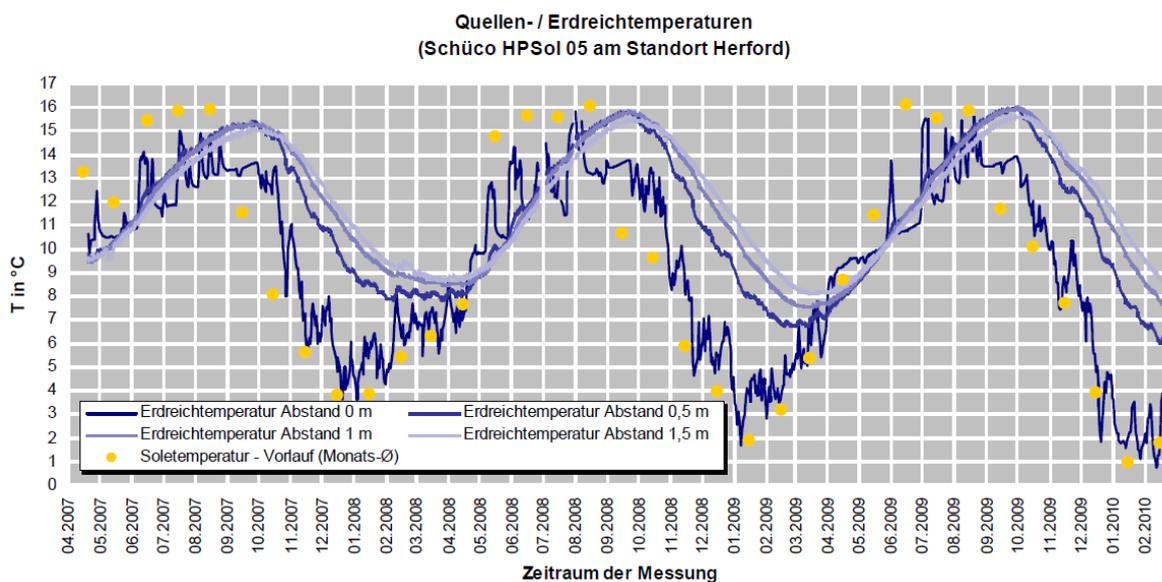


Abbildung 4-18 Temperaturverlauf des Erdreichs über die ersten drei Jahre (TGA Fachplaner, 2010)

Schüco gibt eine Steigerung der Systemarbeitszahl von durchschnittlich 35% und eine elektr. Energieeinsparung der Wärmepumpe von 25% an. Dabei stützten sie sich auf die Ergebnisse ihres Feldtests.

Ganz anders sieht das die Fa. Buderus (Rieger, et al., 2010). Diese hat unter den gleichen Voraussetzungen eine Studie durchgeführt. Diese Studie umfasste vier verschiedene Systeme die in der Abbildung 4-19 zu sehen sind.

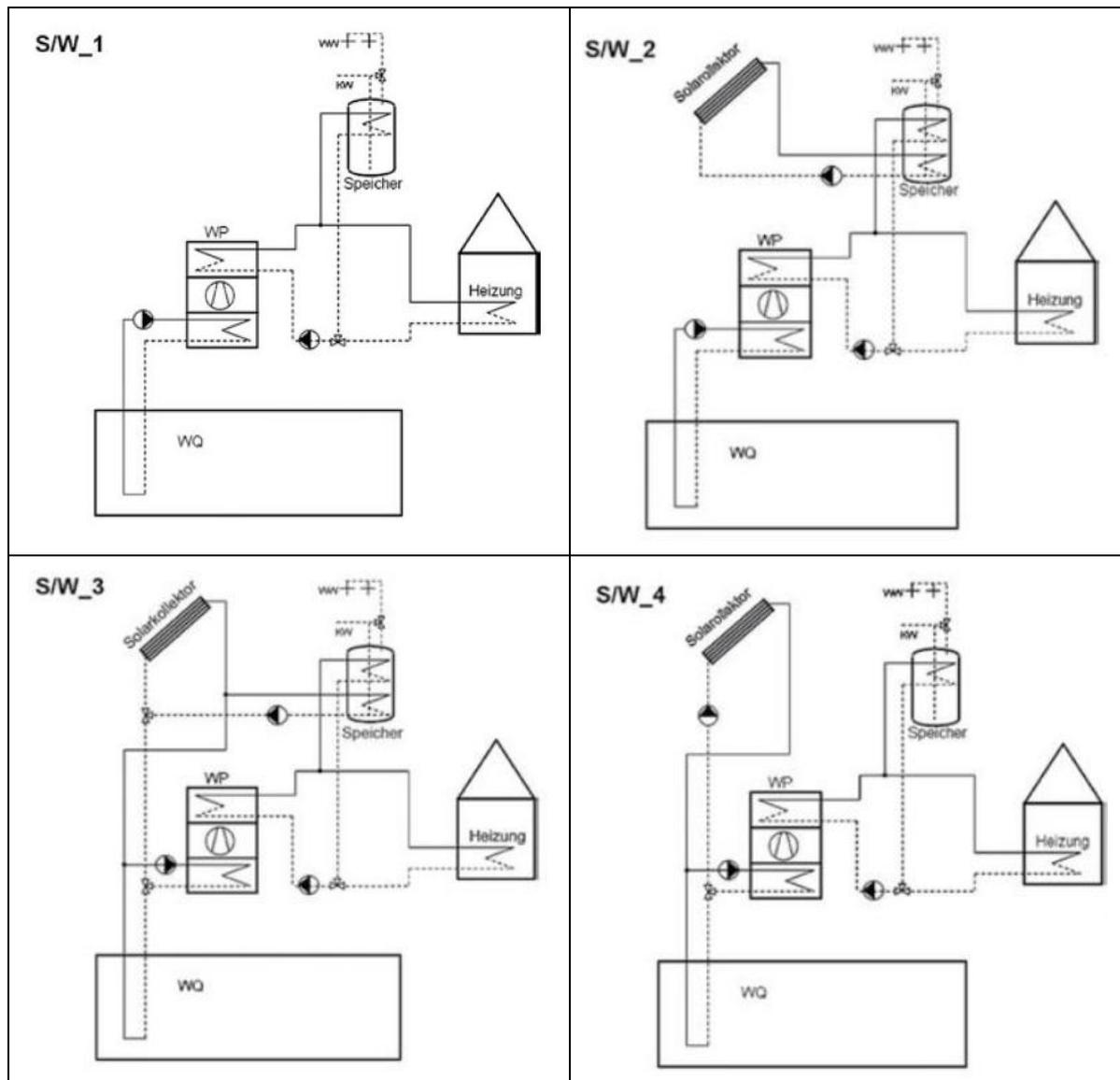


Abbildung 4-19 von Buderus untersuchte Solar-Wärmepumpensysteme (Rieger, et al., 2010)

Der Versuch wurde zuerst für zwei repräsentative Tage im April durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen konnte man erkennen, dass an sonnigen Tagen keine Wärmepumpe zur Bereitstellung des Brauchwasserbedarfs notwendig ist, wenn die Wärme direkt von den Solarkollektoren bereitgestellt wird (S/W_2 und S/W_3). Wird die solarthermische Energie nur zur Regeneration des Erdreichs verwendet, muss immer die Wärmepumpe den Energiebedarf decken (S/W_4). Das führt zu ähnlichen Schaltzeiten wie in dem Betrieb mit einer monovalenten Wärmepumpe (S/W_1). Tabelle 4-2 zeigt, wie sich die Energieflüsse an den diesen zwei Tagen in den Systemen unterscheiden.

Tabelle 4-2 Ausgewählte Energiewerte für zwei beispielhafte Tage im April (Rieger, et al., 2010)

Kennwerte	Einheit	S/W_1	S/W_2	S/W_3	S/W_4
		Sole/Wasser-WP ohne Solarkopplung	Sole/Wasser-WP mit direkter Solareinbindung	Sole/Wasser-WP mit direkter Solareinbindung und Quellenanhebung	Sole/Wasser-WP mit Quellenanhebung
Wärmeeintrag der Wärmepumpe in den Speicher	kWh	18,9	12,7	12,7	18,9
dafür notwendige Kompressorenergie (elektrisch)	kWh	7,1	4,9	4,8	6,9
Solareintrag in den Speicher und/oder das Erdreich	kWh	–	15,5	25,9	38,7

Um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen, müssen diese Systeme über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. In Tabelle 4-3 sind die Energiewerte für ein ganzes Jahr aufgezeigt. Zusätzlich wurden noch weitere Bewertungskriterien eingeführt.

Das Ergebnis dieser Studie war, dass sich ohne hohen Regelaufwand keine Verbesserungen im Vergleich zu einer Anlage, die eine Wärmepumpe und eine Solarthermische Anlage parallel betreibt, ergeben. Die Regelung müsse das Problem der Prioritätenfolge lösen, um die Systemeffizienz verbessern zu können. Die größte Einsparung bei der benötigten Kompressionsenergie liefert das System S/W_2, in welchem die Solarenergie direkt genutzt wird. Hier wird im Vergleich zur monovalenten Wärmepumpe um 641 kWh/a weniger elektrische Energie für den Kompressor benötigt.

Damit ist die Empfehlung der Fa. Buderus die direkte Nutzung der solarthermischen Energie immer der indirekten zur Erhöhung der Wärmepumpenquelltemperatur vorzuziehen, da kein zusätzlicher Energieaufwand betrieben werden muss, um die solarthermische Energie auf ein nutzbares Temperaturniveau zu heben. Laut Buderus ergibt sich lediglich eine Effizienzsteigerung der Wärmepumpe von 10% und somit nur eine geringe elektrische Energieeinsparung, die sich durch den Mehrverbrauch der Pumpen sogar negativ im Systemvergleich auswirkt.

Tabelle 4-3 Ausgewählte Energiewerte für ein komplett simuliertes Jahr (Rieger, et al., 2010)

Kennwerte	Einheit	S/W_1	S/W_2	S/W_3	S/W_4
		Sole/Wasser-WP ohne Solarkopplung	Sole/Wasser-WP mit direkter Solareinbindung	Sole/Wasser-WP mit direkter Solareinbindung und Quellenanhebung	Sole/Wasser-WP mit Quellenanhebung
Wärmepumpen-Kompressorenergie für Heizung und Warmwasser	kWh	3441	2800	2900	3306
Solareintrag in den Speicher und/oder das Erdreich	kWh	–	2194	4776	5964
dafür benötigte Energie für die Solarkreis-pumpe	kWh	–	94	129	167
Wärmeeintrag der Wärmepumpe in den Speicher	kWh	3485	1618	2073	3429
Kompletter elektrischer Energieeinsatz aller Aggregate (ohne Regelung)	kWh	3830	3225	3368	3846
Anteilige Energieeinsparung	%	0	15,8	12,1	0
Laufzeit der Wärmepumpe	h	1921	1636	1666	1827
Anzahl der Starts der Wärmepumpe		1825	1046	1421	2333

4.5.4 Kombination von Solaranlage mit Luft- Wärmepumpe

Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE hat eine Studie durchgeführt, welche das Potential einer Luft/Wasser- Wärmepumpe in Kombination mit einer solarthermischen Anlage aufzeigen soll (Henning, et al., 2009). Im Rahmen dieser Studie wurden vier verschiedene Systeme analysiert:

- Variante 1: Referenzsystem Luft/Wasser-Wärmepumpe ohne Solaranlage
- Variante 2: Luft/Wasser-Wärmepumpe und Solaranlage arbeiten parallel
- Variante 3: Luft/Wasser-Wärmepumpe und Solaranlage kombiniert über Speicher (300l)
- Variante 4: Luft/Wasser-Wärmepumpe und Solaranlage kombiniert mit Latentwärmespeicher (300l) mit Schmelzbereich zw. 15°C und 20°C und einer Schmelzwärme von 330kJ/kg

Bei der Simulation sind folgende Randbedingungen angenommen worden:

- Wetter: Testreferenzjahr 13 (Passau)
- Datenbasis: Stundendaten, Simulation in 1-Minuten-Schritten
- Einfache Modelle (stationär außer Speicher)
- Flachkollektor, 6 m² Apertur, 40° nach Süden geneigt
- Kennlinien-Modell Wärmepumpe: Arbeitszahl $e = f(T_{\text{Kondensator}} - T_{\text{Aussenluft}})$
- Lastprofil Einfamilienhaus 140 m²
- Heizwärmebedarf 8400 kWh/a (60 kWh/m² a)
- Wärmebedarf Brauchwasser 2480 kWh/a (17,7 kWh/m² a)

Die Regelung der Anlage erfolgte nach folgenden Richtlinien:

- Betrieb Solarkollektor
 - Erste Priorität: Brauchwasser wird geladen
 - Zweite Priorität: Heizungsbereich des Speichers wird geladen
 - Dritte Priorität: Laden des Niedertemperatur-Pufferspeicher
 - Umschalten auf nächste Stufe/Priorität bei Unterschreitung eines Nenn-Wirkungsgrades
- Wärmepumpe stellt bestimmte Mindesttemperatur in den jeweiligen Speicherbereichen sicher (Brauchwasser, Heizung)
- Wärmepumpe nutzt die jeweils wärmere Wärmequelle (Außenluft, Niedertemperatur-Pufferspeicher)

Die Ergebnisse (Tabelle 4-4) zeigen eine geringe Verbesserung zwischen dem parallelen Betrieb und dem kombinierten Betrieb mittels eines Niedertemperatur-Pufferspeichers. Erst beim Einsatz mit einem Latentwärmespeicher wird das Potential dieser Verschaltungsvariante deutlich gesteigert. Man kann erkennen, dass eine Steigerung der Systemarbeitszahl im Vergleich zur parallelen Variante um 12,8% auf 4,05 möglich ist. Die

Systemarbeitszahl des kombinierten Systems mit einem wassergefüllten Niedertemperaturspeicher erreicht lediglich einen Wert von 3,65 und somit nur eine Steigerung von 1,7% gegenüber der parallelen Variante.

Tabelle 4-4 Simulationsergebnisse einer Luft-Wärmepumpe (Miara, 2010)

Variante	#1	#2	#3	#4
Beschreibung	Referenzsystem: nur Luft-WP	Solaranlage und Luft-WP getrennt	Solaranlage und Luft-WP kombiniert; Niedertemperatur- Pufferspeicher (Wasser)	Solaranlage und Luft-WP kombiniert; Niedertem- peratur-Pufferspeicher (Latentspeicher mit Schmelzbereich 15..20°C)
SF _{BWW}	-	59.4%	57.9%	49.0%
SF _{gesamt}	-	13.5%	14.5%	13.6%
ϵ_{WP}	3.03	3.15	3.17	3.68
ϵ_{System}	3.00	3.59	3.65	4.20

Dieses theoretische Einsparungspotential versucht CONSOLAR durch ein eigenentwickeltes Komplettsystem mit dem Namen SOLEARA zu vertreiben (Neukomm, et al., 2010). Die Besonderheit dieses Systems ist ein Hybridkollektor, der in der Lage ist, nicht nur die Sonneneinstrahlung sondern auch die Wärme der Umgebungsluft zu nutzen, um einen Latentwärmespeicher zu erwärmen. In Abbildung 4-20 ist der schematische Aufbau dieser Anlage dargestellt.

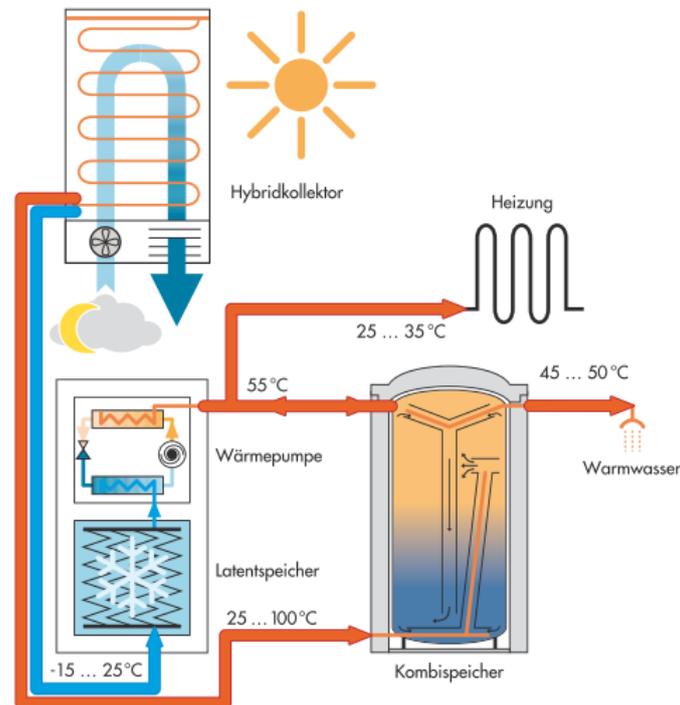


Abbildung 4-20 Anlagenschaubild von SOLEARA der Fa. Consolar (Neukomm, et al., 2010)

Wie man erkennen kann wird auch hier vorrangig die Aufladung des Kombispeichers direkt betrieben. Sind die erreichten Temperaturen in einem für den Kombispeicher unbrauchbaren Temperaturbereich unter 25 °C, wird der Latentspeicher erwärmt.

Dieses System kann ein Einfamilienhaus bis max. 13000 kWh jährlichen Energiebedarf versorgen. Dabei wird eine standortabhängige Kollektorfläche von 14 bis 38 m² vorgeschrieben. Wird mehr Energie benötigt, kann mit einem Bestandskessel oder einem zusätzlichen Zimmerpelletsofen nachgeheizt werden. Die Kollektoren sollten in einem Aufstellwinkel von 40° - 90° montiert werden, damit im Winter ein optimaler Strahlungseinfallswinkel vorliegt und der Schnee vom Kollektor abgleiten kann. Ab einem Kollektorwinkel von 40° sind diese Kollektoren fast überall in Deutschland einsetzbar. Nur im schneereicheren Süden gelten einige Einschränkungen.

Laut einer Studie vom ITW Stuttgart, die mithilfe des Simulationstools TRNSYS durchgeführt wurde, können Systemarbeitszahlen von über 5 mit dem System von Consolar erreicht werden. Nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchung.

Tabelle 4-5 Simulationsergebnisse der SOLAERA an zwei Standorten . (Neukomm, et al., 2010)

		Fall A	Fall B
Heizwärmebedarf	kWh/a	9090	6817
WW-Bedarf inkl. Verlusten	kWh/a	3589	3589
Gesamtwärmebedarf	kWh/a	12679	10406
Kollektorfläche	m ²	25	20
Kollektorertrag gesamt	kWh/a	11203	9247
-davon in Kombispeicher	kWh/a	4654	4217
Wärmeabgabe der Wärmepumpe	kWh/a	8892	6991
elektr. Energieverbr. Wärmepumpe	kWh/a	2208	1830
Hilfsenergie elektrisch, Energiebedarf			
-des elektrischen Heizstabs	kWh/a	6	4
-des Ventilators	kWh/a	98	69
- der Solarkreis- und Verdampferkreis-Pumpe	kWh/a	149	138
Jahresarbeitszahl WP		4.0	3.8
System-Jahresarbeitszahl		5.2	5.1

Diese Arbeitszahlen sind aber mit Kollektorflächen über 20 m² zu erreichen. In der Simulation des ISE am Beginn des Kapitels wurde eine Kollektorfläche von 6 m² angenommen. Der Heizstab wird nur als Backup verwendet, falls die Energie der Solarstrahlung und der Umgebungsluft nicht mehr ausreicht um das System zu versorgen.

In einem Feldtest der seit dem Jahr 2006 durchgeführt wird, wurden die gemessenen Werte mit den simulierten verglichen. Es ergaben sich Abweichungen kleiner 1%, und beweisen so eine hinreichende Genauigkeit der Simulation.

In der Abbildung 4-21 ist zu erkennen, welcher Ertrag vom Kollektor angefallen ist, und wie dieser genutzt wurde.

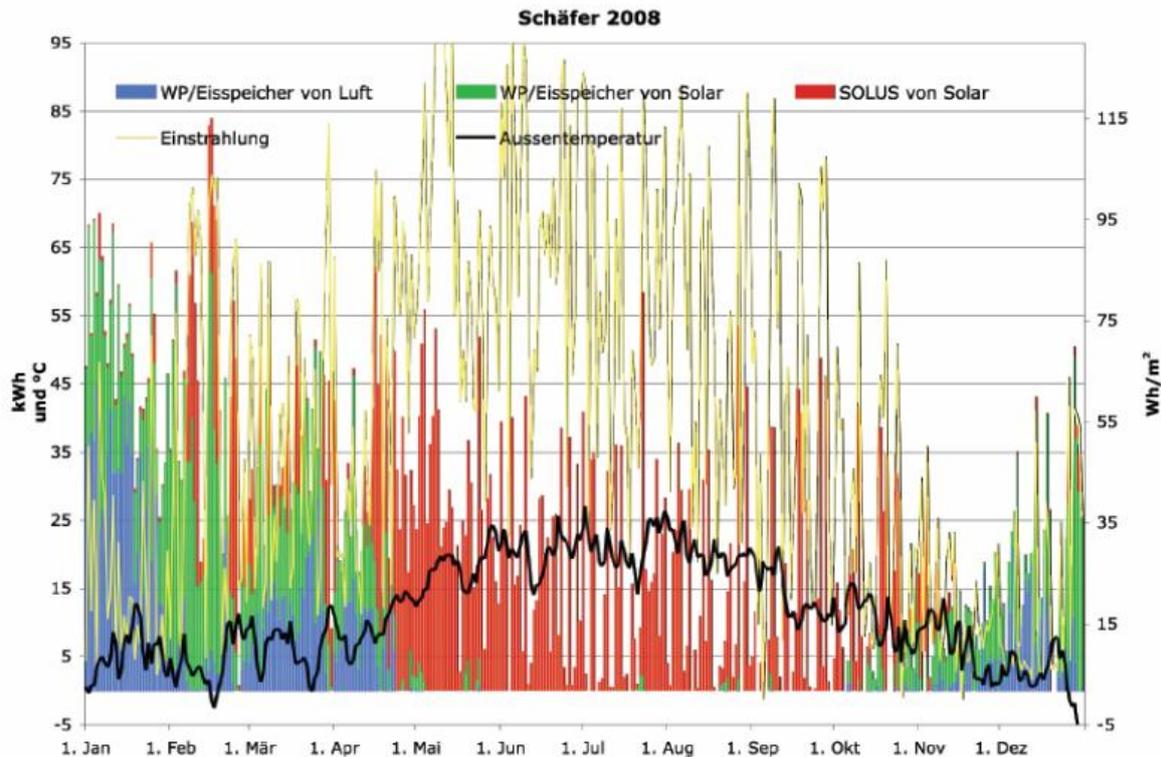


Abbildung 4-21 Wärmemengenverteilung der Wärmeerzeuger einer SOLAERA Feldtestanlage in einem Untersuchungsjahr. (Neukomm, et al., 2010)

Es ist gut zu erkennen, dass von Mai bis Oktober praktisch die vollständige Wärmeversorgung durch direkte Nutzung der Solarstrahlung ohne Wärmepumpe erfolgte (rote Striche). Zu Beginn des Jahres nahm aufgrund der Lufttemperaturen von 13 °C der Anteil der Luft als Wärmequelle zu (blaue Striche). Zudem wird in der Abbildung deutlich, dass bei besonders tiefen Temperaturen, wie sie am Ende des Jahres vorherrschten, der Anteil der Strahlungsenergie zur Versorgung der Wärmepumpe (grün) gegenüber der Nutzung von Luftwärme anstieg. Eine reine Luftwärmepumpe hätte bei diesen Temperaturen sehr schlechte Leistungszahlen. Durch die Strahlungswärme konnte aber die Wärmepumpe auch in dieser Zeit einigermaßen effizient betrieben werden.

5 Vorbereitung der Simulation

5.1 Randbedingungen/ Gebäude

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig ein Gebäude und dessen Verbrauchswerte zu definieren, welches von allen untersuchten Systemen zu versorgen ist. Als Zielgruppe einer kombinierten Solar-/Wärmepumpenanlage sind Neubauten angenommen worden. Daher wurde als Referenz ein Einfamilien-Neubau mit 150 m² beheizter Wohnfläche gewählt, dass den Anforderungen der EnEV 2007 genügt. Die Gebäudedaten sowie die Verbrauchsdaten sind:

- Gebäude:
 - Neubau mit einer Heizanforderung von 50 kWh/m²a nach EnEV 2007
 - 150 m² beheizte Wohnfläche

- Warmwasserbedarf:
 - 4 Personen Haushalt (200 l pro Tag)
 - 50 l pro Person und Tag bei 50 °C
 - Spezifischer Energiebedarf: 22 kWh/m²a
 - Hauptsächlicher Bedarf des Warmwassers in den Abendstunden

Aus diesen Verbrauchsdaten ergibt sich ein Gesamtwärmebedarf von 11550 kWh/a, der von dem Heizungssystem zu decken ist.

Die zu vergleichenden Systeme sind mit Komponenten aus dem Produktportfolio der Fa. Wolf erstellt worden. Da dieser Hersteller ein Komplettsystemanbieter für Heizungsmonteur ist, konnten alle notwendigen Bauteile wie Wärmepumpen und Solarsysteme aber auch Speicher und Regelungssysteme aus einer Hand gewählt werden.

5.2 Vorstellung der drei Anlagenvarianten

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation von drei Anlagenvariationen, die jeweils das definierte Gebäude versorgen sollen. In den folgenden Abschnitten wird ein kurzer Überblick über die Anlagen gegeben. Eine detaillierte Beschreibung inklusive der dazugehörigen Schemen folgt im Kapitel 0

5.2.1 Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“

Die Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ muss ohne solare Unterstützung den gesamten Wärmebedarf des Gebäudes, trotz gleicher Auslegung der Wärmepumpe decken. Das erfordert teilweise andere Komponenten, sowie im Vergleich zu den beiden anderen Anlagenvarianten eine stark abweichende hydraulische Verschaltung. Das Schema ist in Kapitel 0 in der Abbildung 6-2 dargestellt.

5.2.2 Anlagenvariante „Wolf“

Um einen direkten Vergleich zu haben ist eine Systemvariante mit Komponenten der Fa. Wolf ohne Interaktion zwischen Solarthermie und Wärmepumpe gewählt worden, die auch in dieser Art von Wolf vertrieben wird. Diese besteht aus einer Solaranlage mit 6 Kollektoren à 2 m² gefordert. In Verbindung mit einer Wärmepumpe ergibt dieses System eine energiesparende und zukunftsorientierte Möglichkeit, den Wärmebedarf eines Haushalts zu decken. Die Wärmepumpe kann dabei in mehreren Varianten gewählt werden, wobei diese sich hauptsächlich in der Art der Wärmequelle unterscheiden. Das dazugehörige Schema ist in Kapitel 0 in der Abbildung 6-3 zu finden.

5.2.3 Anlagenvariante „Kombination“

Eine der Vorgaben war, dass die Anlage ohne konstruktive Veränderungen der Komponenten zu realisieren sein muss. Obwohl eine Einbindung der Solaranlage in eine Luft-Wärmepumpe am erfolversprechendsten erscheint, ist diese Variante nicht gewählt worden, da dabei ein Umbau des Verdampfers notwendig wäre. Dieser müsste einerseits mit Luft und andererseits mit Flüssigkeit zu erwärmen sein (Hybridverdampfer). Dies könnte beispielsweise durch Vorschalten eines Heizregisters in die Ansaugluft der Wärmepumpe realisiert werden.

Eine weitere Variante ist die aktive Regeneration, die vor allem den Vorteil hat, dass Stagnation im Sommer teilweise vermieden werden kann. Die Gewinne durch das erwärmte Erdreich nach den Ergebnissen im Kapitel 4.5.3 sind zu wenig erfolversprechend, weshalb diese Möglichkeit auch ausgeschlossen wurde.

Wegen des Wegfalls der besprochen Kombinationsvarianten ist die verbleibende Variante, die einen Pufferspeicher (Niedertemperaturspeicher) als Schnittstelle von Solaranlage und Wärmepumpe nutzt, gewählt worden. Diesen Speicher als Latentspeicher auszuführen wurde aus Gründen der Komplexität nicht weiter untersucht.

Die Anlagenvariante „Kombination“ basiert auf das im Kapitel 4.4.3.2 vorgestellte System, und unterscheidet sich von der Anlagenvariante „Wolf“ nur durch einen weiteren Pufferspeicher, der im weiteren Text als Niedertemperaturspeicher bezeichnet wird (Kapitel 0, Abbildung 6-4). Als kostengünstigste Variante ist ein mit Sole gefüllter Speicher mit einem Wendelwärmetauscher angesehen worden. Der Wendelwärmetauscher ist in den Solarkreislauf eingebunden und kann durch das Umschalten eines 3-Wegeventils mit Solarflüssigkeit durchströmt werden. Die erwärmte Sole dient als alternative Wärmequelle für die Sole/Wasser-Wärmepumpe.

5.3 Auswahl eines Simulationstools

Es gibt eine Vielzahl von Simulationssoftware die den Energieverbrauch eines Gebäudes mit vordefinierten Schaltschemen berechnen können. Die Simulation der vorgestellten Anlagenvarianten erfordert aber die Möglichkeit ein Heizungssystem individuell zu erstellen. Bei der Recherche wurden zwei Simulationstools gefunden, die es erlauben ein individuelles Heizungssystem zu erstellen: TRNSYS und Polysun

TRNSYS (Transsolar Software V.17, 2012) ist ein sehr komplexes Programm das dem Anwender viel Spielraum in der Systemgestaltung bietet. Die Bauteile und Systemkomponenten werden in TRNSYS Types genannt. Diese Types basieren auf einen C++ oder FORTAN-Code und können von erfahrenen Anwendern editiert bzw. neu erstellt werden. Dieser Freiraum an Gestaltungsmöglichkeit erfordert aber auch eine lange Einarbeitungszeit, um korrekte Simulationen erstellen zu können.

Mit **Polysun** (Vela Solaris AG, 2012) der Firma „VELA SOLARIS“ ist es möglich, ein kombiniertes System im Programm abzubilden und energetisch über den Zeitraum von einem Jahr zu betrachten. Die Software lässt die Nachbildung eigener Komponenten mit bestimmten Kennwerten und Eigenschaften zu. Mit der Programmversion „Designer“ ist es auch möglich, eigene Schaltungsvarianten aufzubauen.

Daher wurde zur Simulation der Anlagenvarianten Polysun verwendet. Die Einarbeitungszeit fällt bei Polysun erheblich kürzer aus als bei TRNSYS. Durch die Programmierung mittels Symbolen ist vieles selbsterklärend, und durch die umfangreiche Dokumentation kann man sich auch ohne Support gut weiterhelfen. Die vorhandenen Symbole/Bauteile sind zur Darstellung der Systeme ausreichend.

Das Simulationsprogramm Polysun beschränkt den Anwender allerdings sehr in der freien Gestaltung der Regelung. Es bietet lediglich 10 verschiedene Regler an. In diesen sind die Eingangs- und Ausgangsparameter fest vorgeschrieben. Die Verknüpfung verschiedener logischer Operatoren, die mit unterschiedlichen Größen gebildet wurden, ist nicht möglich. Das folgende Beispiel soll die Problematik verdeutlichen:

Die Regelung „Temperatur mit UND/ODER Verknüpfung“ lässt es zu, zwei Temperaturen logisch zu verknüpfen. D.h. wenn Temperatur 1 größer als Temperatur 2, dann ist Ausgang X gleich 1. Durch die UND und ODER Option kann noch ein weiteres Temperaturpaar wie beschrieben logisch verknüpft werden. Das bedeutet, wenn Temperatur 1 größer als Temperatur 2 UND/ODER Temperatur 3 größer Temperatur 4, dann ist Ausgang X gleich 1. Es ist allerdings nicht möglich, eine logische Verschaltung beispielsweise eines Temperaturpaares und dem Status einer Pumpe zu machen.

Die Anforderung an die Regelung ist speziell bei dieser Aufgabenstellung besonders hoch. Aus den Erkenntnissen der Forschungsarbeiten ist bekannt, dass es sehr schwer ist, entscheiden zu können, ob die Solarwärme direkt oder indirekt über die Wärmepumpe

genutzt werden kann. Noch schwieriger wird es, wenn man dann noch eine Regelstrategie entwerfen muss, die fähig ist, diese Entscheidung treffen zu können. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass nicht die optimalste Lösung durch Polysun gefunden werden kann. Es können aber Tendenzen erwartet werden, die den Einsatz von Polysun durchaus rechtfertigen.

5.4 Komponenten und Kennwerte

Ein sehr wichtiger und zeitaufwendiger Punkt war die Auswahl und Einpflegung der Komponenten in das Katalogsystem von Polysun. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten und deren Einsatz gezeigt. Es wird genauso auf die technischen Daten eingegangen, die notwendig sind, um die Komponente in Polysun einzupflegen.

5.4.1 Speicher

Polysun gibt dem Anwender die Möglichkeit sehr detailgenau den Speicher nachzubilden. Wie man in Abbildung 5-1 sehen kann wird der Speicher von Polysun in 12 Schichten unterteilt. Die Höhen der verschiedenen Komponenten eines Speichers werden in Prozent der Speicherhöhe ohne die Höhe der Ausbauchungen am Speicherboden und Speicherdeckel angegeben. Solche Komponenten können

- Anschlüsse
- Wärmetauscher
- Tank in Tank-System
- Schichtlanzen

sein. Es können neben der Höhe auch die Parameter dieser Speicherbestandteile verändert werden.

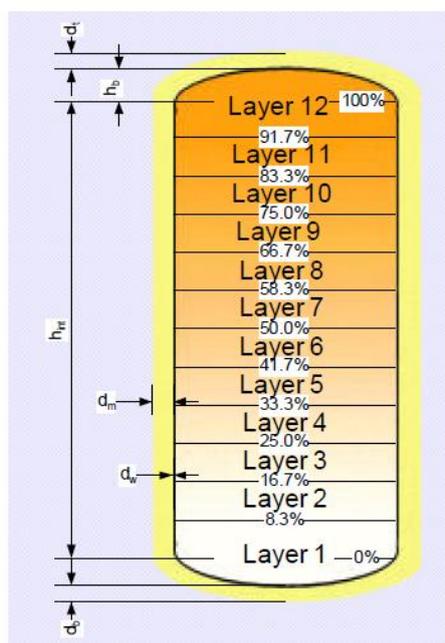


Abbildung 24: Speicherbemessung und Schichten
(d_m =Dämmstärke, d_t =Dämmstärke beim Deckel,
 d_b =Dämmstärke am Speicherboden,
 d_w =Wandstärke, h_{int} =Höhe, h_b =Höhe der Ausbauchung)

Abbildung 5-1 Definition der Schichthöhen im Polysun-Speicher (Vela Solaris, 2012)

Der Speicher kann in seinen Abmaßen variiert und mit verschiedensten Materialien isoliert werden.

Daraus ergeben sich sehr viele Kombinationsmöglichkeiten und es wird so eine sehr individuelle Programmierung ermöglicht. Da eine genaue Ausführung der Möglichkeiten hier zu ausführlich wäre, möchte ich hier auf das Benutzerhandbuch von Polysun verweisen (Vela Solaris, 2012).

5.4.1.1 Pufferspeicher (BSP-W-SL 1000)

Die BSP-Reihe zählt zu den Kombispeichern, die von der Firma Wolf vertrieben werden. Im BSP-W-SL sind 2 Wendelwärmetauscher verbaut, welche die solare Schichtbeladung ermöglichen. Zwischen den beiden Wärmetauschern sind zwei „Schicht-Trennplatten“ angebracht, die eine Durchmischung der thermischen Schichtung vermeiden sollen. Da bei Wärmepumpen hohe Volumenströme gefahren werden, ist auch hier die Gefahr der Durchmischung am größten.

Untersuchungen der Fa. mit einer Wärmebildkamera haben gezeigt, dass es am effizientesten ist, wenn der Vorlauf zur Warmwasserbereitung zwischen den Trennplatten, und der Rücklauf oberhalb der Trennplatten angeordnet sind (Wolf GmbH). Bei der Beladung wird der Bereich zwischen den Trennplatten erwärmt bis die warme Schicht bis zum Warmwasser-Temperaturfühler aufgestiegen ist. So wird ein definiertes Volumen im Puffer nachgeladen, und eine Durchmischung des gesamten Warmwasserbereichs im Speicher vermieden. Allerdings ist die Nachbildung der Schichttrennplatten mit Polysun nicht möglich. Daher wurde die Art der Beladung simuliert die üblicherweise realisiert wird. Abbildung 5-2 zeigt den Schichtenspeicher BSP-W-SL mit den Anschlusspaaren zur Beladung und Entnahme von Warmwasser und Heizung. Die orange Umrahmung kennzeichnet die Bereiche für Warmwasser- und Heizungswärmespeicher. Der Kaltwasserrücklauf ist auf der Höhe des Warmwasseranschlusses in den Speicher geführt. Im Speicher führt ein Rohr das Kaltwasser bis zum Boden.

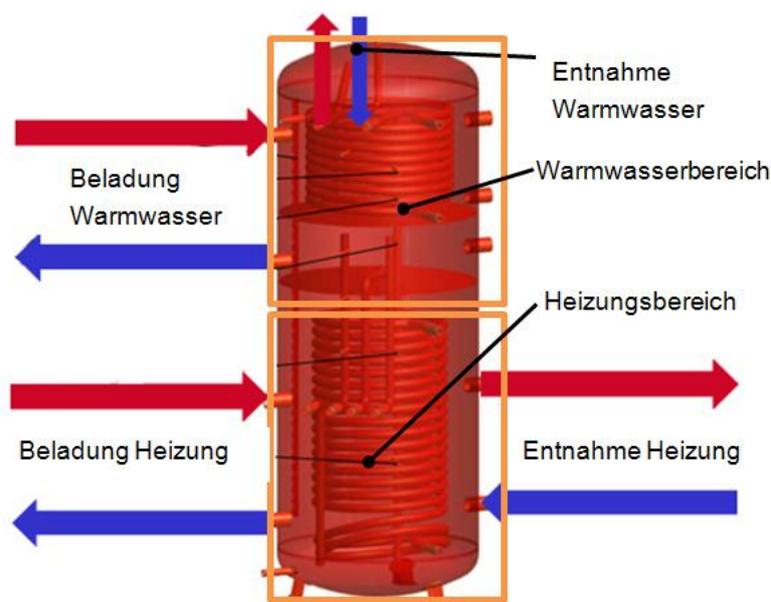


Abbildung 5-2 Schichtenspeicher BSP-W-SL mit zwei Wendelwärmetauschern für die solare Beladung

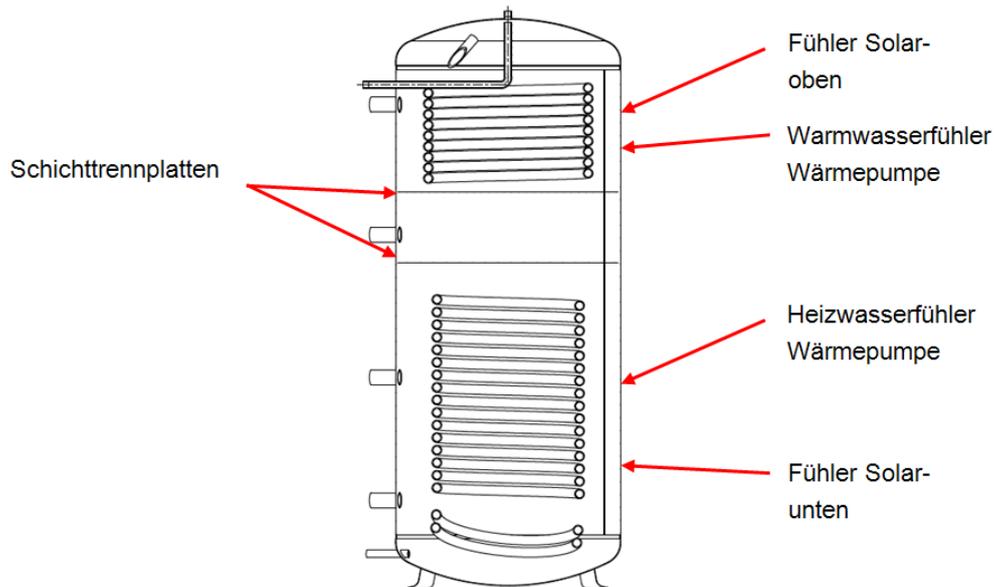


Abbildung 5-3 Höhen der Speicherfühler sowie der Schichttrennplatten im Pufferspeicher BSP-W-SL-1000

Die technischen Daten des BSP-W-SL-1000 sind in der Tabelle 5-1 aufgelistet

Tabelle 5-1 Technische Daten BSP-W-SL-1000

BSP-W-SL-1000	
Speicherinhalt	915 l
Höhe des Speichers inkl. Dämmung	2,11 m
Durchmesser des Speicher inkl. Dämmung	1 m
Wärmetauscherfläche oberer Wärmetauscher	1,9 m ²
Wärmetauscherinhalt obere Wärmetauscher	11 l
Wärmetauscherfläche unterer Wärmetauscher	3 m ²
Wärmetauscherinhalt unterer Wärmetauscher	19,8 l
Höhe des Fühlers Solar-oben	1,7 m
Höhe des Fühlers Solar-unten	0,74 m
Höhe des Warmwasserfühlers Wärmepumpe	1,33 m
Höhe des Heizwasserfühlers Wärmepumpe	0,54 m

An der Speicherhülle ist eine Fühlerklemmleiste angebracht an denen die Temperaturfühler geklemmt werden können. Der 10 cm dicke Isoliermantel umhüllt den Speicher und die Fühlerklemmleiste, sodass die Fühler die Temperatur des Speicherinhalts auf der angebrachten Höhe annehmen können.

5.4.1.2 Niedertemperaturspeicher (SPU-2-W)

Zur Anhebung der Quelltemperatur wird ein dritter Speicher benötigt, der die „überflüssige“ bzw. nicht direkt verwendbare solare Energie aufnehmen kann.

Wie auch schon in der Simulation im Abschnitt 0, die Frau Mette durchgeführt hat, bietet sich ein druckloser Speicher mit Wendelwärmetauschern an. Da die Fa. Wolf keinen Pufferspeicher vertreibt der zwei Wendelwärmetauscher besitzt und der für diesen Einsatz geeignet wäre, wurde ein Pufferspeicher gewählt, der nur einen Wendelwärmetauscher besitzt (siehe Abbildung 5-4). Der Puffer wird mit der Soleflüssigkeit gefüllt und von der Wärmepumpe direkt durchströmt. Da der Puffer mit Sole gefüllt ist, besteht trotz Temperaturen unter 0 °C keine Vereisungsgefahr.

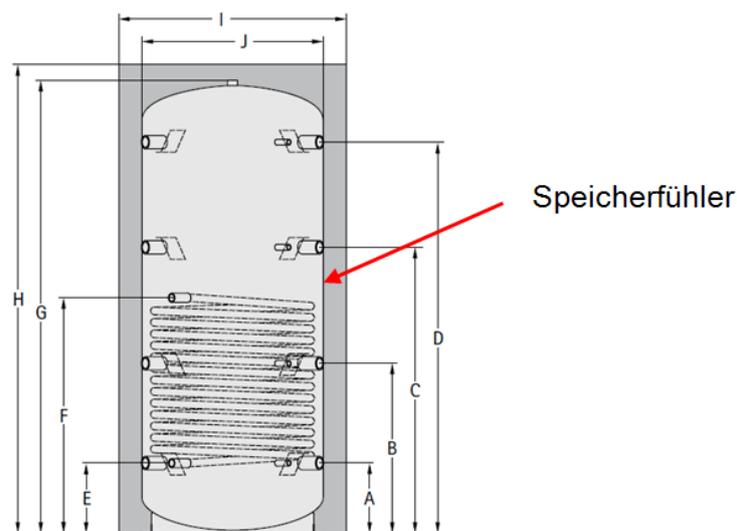


Abbildung 5-4 Niedertemperaturspeicher SPU-2-W

Den SPU-2-W gibt es in mehreren Ausführungen, die sich in der Größe des Speichervolumens unterscheiden. Die Tabelle 5-2 zeigt einen Überblick der verschiedenen Modelle.

Tabelle 5-2 Modellvarianten des SPU Pufferspeichers

TYP	SPU-1	200	500	800	1000	1500	2000	3000	4000	5000	
Speicherinhalt	SPU-1	Ltr.	200	-	-	-	-	-	-	-	
	SPU-2-W	Ltr.	-	480	730	915	1520	-	-	-	
	SPU-2	Ltr.	-	490	775	935	1545	2050	2955	4040	5055

In der Simulation wurden die Modelle mit 500 und 800 Liter Volumen auf ihre Effizienz im System getestet. Es konnte eine geringe solare Ertragsteigerung erkannt werden, die aber keine markante Energieeinsparung bei der Simulation zur Folge hatte. Dieses geringe Verbesserungspotential rechtfertigt den Kostenaufwand für Speicher und Solefüllung nicht, weshalb der SPU-2-W-500 gewählt wurde. Die Daten sind in der Tabelle 5-3 noch einmal detailliert aufgelistet.

Tabelle 5-3 Technische Daten des SPU-2-W-500

SPU-2-W-500	
Speicherinhalt	480 l
Höhe des Speichers inkl. Dämmung	1,72 m
Durchmesser des Speicher inkl. Dämmung	0,85 m
Wärmetauscherfläche	1,8 m ²
Wärmetauscherinhalt	10,5 l
Höhe des Speicherfühlers	0,75 m

Der Speicherfühler wird mittels Fühlerleiste am Speichermantel unterhalb der Isolierung aufgespannt.

5.4.1.3 Trinkwasserspeicher für Anlage Wärmepumpe Stand-Alone

In der Anlage, in der nur eine Wärmepumpe die gesamte Energieversorgung sicherstellen soll, wird ein Speicher benötigt, in dem nur Trinkwasser erwärmt wird. Wegen der großen Durchflussmenge im Ladekreislauf der Wärmepumpe wird ein spezieller Wärmepumpenwärmetauscher eingesetzt. Im Produktportfolio der Fa. Wolf sind diese Speicher mit dem Modelreihennamen SEW zu finden (siehe Abbildung 5-5).

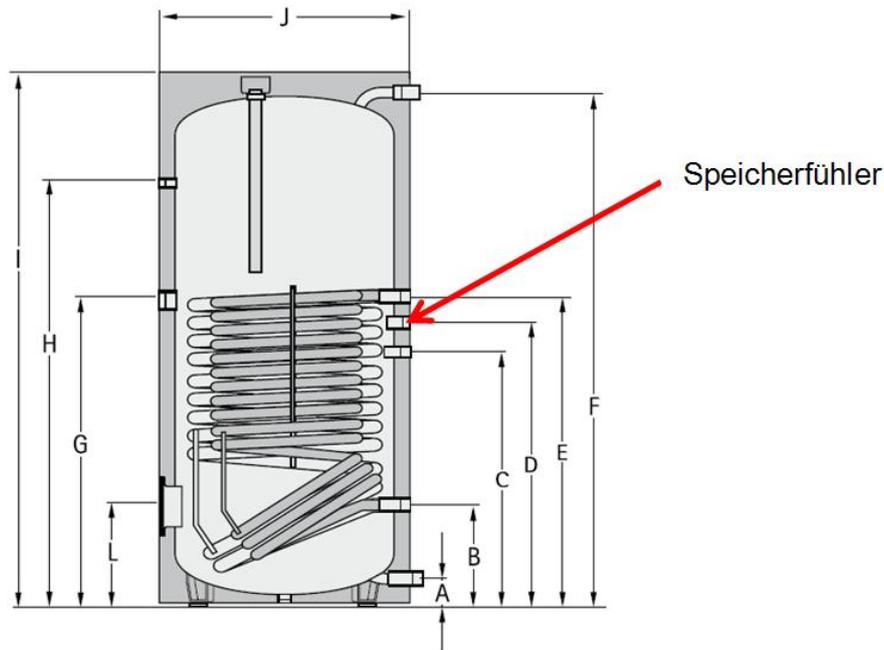


Abbildung 5-5 Aufbau des Wärmepumpenspeicher SEW-1

Für einen durchschnittlichen Haushalt mit 4 Personen reicht ein Trinkwasserspeichervolumen von 300 l. Daher wurde für die Simulation das Model SEW-1-300 gewählt. In der Tabelle 5-4 sind die technischen Daten aufgelistet.

Tabelle 5-4 Technische Daten SEW-1-300

SEW-1-300	
Speicherinhalt	288 l
Höhe des Speichers inkl. Dämmung	1,31 m
Durchmesser des Speicher inkl. Dämmung	0,7 m
Wärmetauscherfläche	3,5 m ²
Wärmetauscherinhalt	27 l
Höhe des Speicherfühlers (Maß C)	0,656 m

5.4.2 Wärmepumpe

In Polysun können Luft/Wasser, Sole/Wasser und Wasser/Wasser Wärmepumpen abgebildet werden. Der Betrieb einer Wärmepumpe ist außerhalb gewisser Betriebsbereiche nicht möglich. Daraus ergeben sich drei kritische Betriebspunkte

:

- minimale Quelltemperatur (nur bei Sole/Wasser, Wasser/Wasser)
- maximale Quelltemperatur (nur bei Sole/Wasser, Wasser/Wasser)
- maximale Senktemperatur

Die minimale Quelltemperatur kann bei einer Sole/Wasser Wärmepumpe 0 °C unterschreiten. Speziell bei Wasser/Wasser Wärmepumpe ist die Unterschreitung von 4 °C zu vermeiden, um einem Gefrieren des Wassers vorzubeugen. Wenn 20 °C bis 25 °C im Verdampfer überschritten werden, tritt in der Regel eine Hochdruckstörung auf. Im Kondensator sollten 60°C nicht überschritten werden, um ebenfalls eine Hochdruckstörung zu vermeiden.

In Polysun können Wärmepumpen durch die Angabe der elektrischen und thermischen Leistungen bei mehreren Betriebspunkten definiert werden. Zusätzlich sind noch Angaben über das Kältemittel wie die Füllmenge und dessen Durchfluss im Kältekreis anzugeben.

5.4.2.1 BWS 1-10

Die Fa. Wolf vertreibt fünf Sole/Wasser Wärmepumpen im Leistungsbereich von 5,9 bis 16 kW im Betriebspunkt B0/W35. Diese können monovalent betrieben werden, haben aber zur Absicherung einen E-Heizstab eingebaut, welcher die Versorgung auch bei niedrigen Sole-Temperaturen sicherstellen soll. Die Wärmepumpen der BWS-Reihe (Abbildung 5-6) sind optisch ident und unterscheiden sich nur durch Leistung und Gewicht.

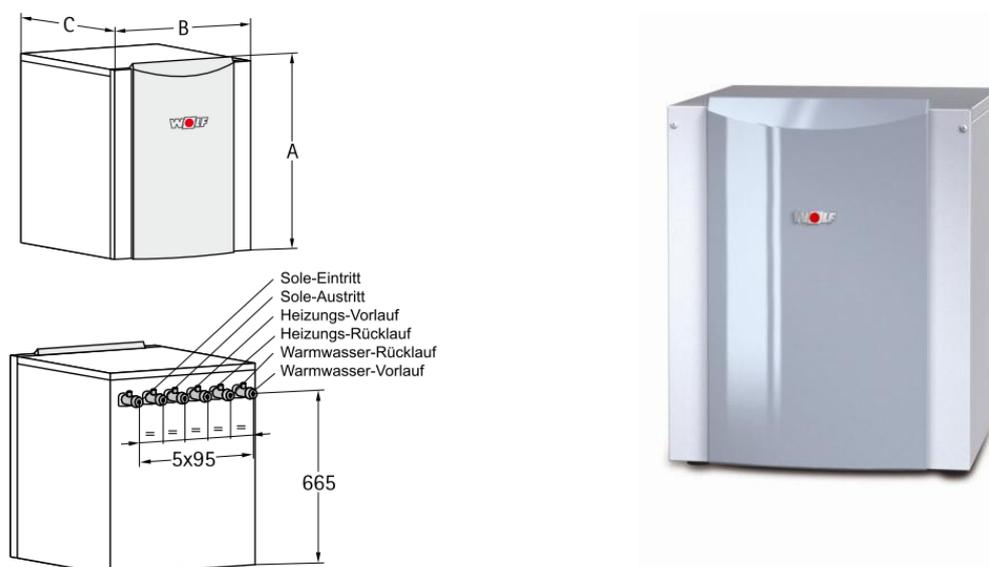


Abbildung 5-6 Modellreihe BWS (Wolf GmbH, 2011)

Die Wärmepumpe kann Vorlauftemperaturen bis 63°C erzeugen, wobei die Soletemperatur nicht unter -5°C fallen darf. Die Pumpen für den Sole- und Heizkreis sind in hocheffizienter Ausführung in der Wärmepumpe integriert.

Aufgrund der Auslegungs-Berechnungen (siehe Anhang) wurde die Wärmepumpe BWS-1-10 gewählt. Ihre technischen Daten werden in der Tabelle 5-5 gezeigt.

Tabelle 5-5 Technische Daten BWS-1 (Wolf GmbH, 2011)

TYP		BWS-1-06	BWS-1-08	BWS-1-10	BWS-1-12	BWS-1-16	
Heizleistung / COP	B0/W35 nach EN255	kW / -	6,3 / 5,0	8,7 / 5,0	11,1 / 5,0	12,3 / 4,9	17,4 / 4,8
	B0/W35 nach EN14511	kW / -	5,9 / 4,7	8,4 / 4,7	10,8 / 4,7	12,0 / 4,7	16,8 / 4,6
	B0/W55 nach EN14511	kW / -	5,3 / 2,8	7,4 / 2,8	9,2 / 2,9	10,5 / 2,8	15,8 / 2,8
	B5/W35 nach EN14511	kW / -	6,9 / 5,3	9,7 / 5,4	12,3 / 5,4	13,8 / 5,3	19,9 / 5,3
	B-5/W45 nach EN14511	kW / -	4,8 / 3,1	6,8 / 3,2	8,6 / 3,1	9,7 / 3,1	14,7 / 3,2
	Gesamthöhe	A mm	740	740	740	740	740
Gesamtbreite	B mm	600	600	600	600	600	
Gesamttiefe	C mm	650	650	650	650	650	
Heizungsvor-/rücklauf, Warmwasservor-/rücklauf, Soleein-/austritt	G (AG)	1½"	1½"	1½"	1½"	1½"	
Schalleistungspegel	dB(A)	41	42	42	43	43	
Schalldruckpegel in 1m Abstand um die Wärmepumpe gemittelt (im Raum)	dB(A)	39	40	40	41	41	
Temperatur Betriebsgrenzen Heizwasser	°C	+20 bis +63	+20 bis +63	+20 bis +63	+20 bis +63	+20 bis +63	
Temperatur Betriebsgrenzen Sole	°C	-5 bis +20	-5 bis +20	-5 bis +20	-5 bis +20	-5 bis +20	
Kältemitteltyp / Füllmenge (Kältekreis hermetisch geschlossen)	-/kg	R407C / 1,8	R407C / 2,0	R407C / 2,25	R407C / 2,8	R407C / 3,1	
Maximaler Betriebsdruck Kältekreis	bar	30	30	30	30	30	
Kältemittelöl		FV50S	FV50S	FV50S	FV50S	FV50S	

Um die Komponente in Polysun zu integrieren werden einige weitere Betriebspunkte, als die hier angegebenen, benötigt. Diese mussten aus den betriebsinternen Versuchsprotokollen entnommen werden. Allerdings gibt Polysun auch an, dass fehlende Betriebspunkte automatisch interpoliert werden.

Es ist in Polysun nicht möglich in der Wärmepumpe einen E-Heizstab zu integrieren, wie es in der Realität der Fall ist. Wenn die Wärmepumpe zu wenig Leistung abgibt wird, am Ende des simulierten Jahres eine Fehlermeldung ausgegeben, dass die Quelltemperatur unterschritten wurde und der Energiebedarf des Gebäudes nicht gedeckt ist.

5.4.3 Kollektor TopSon F3-1

Der in Abbildung 5-7 gezeigte TopSon F3-1 ist das aktuelle Topmodell der Solarkollektoren die von der Fa. Wolf in Mainburg produziert werden. Er zeichnet sich durch geringe Verlustbeiwerte und einen hohen optischen Wirkungsgrad aus. Wie zu erkennen ist, ist an der Rückseite des Absorbers eine mäanderförmige Kupferrohrleitung angeschweißt. Der Absorber wird an der Oberseite durch eine Glasscheibe geschützt. Unterhalb befindet sich eine Schicht aus Dämmwolle, die Verluste an die Umgebung minimieren soll. Eingebettet sind die Komponenten in einer Wanne aus tiefgezogenem Aluminiumblech.

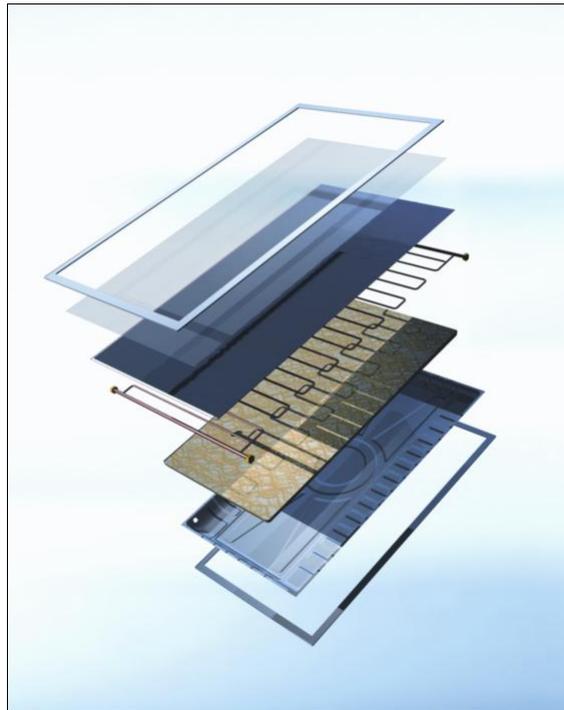


Abbildung 5-7 Aufbau des Solarkollektors TopSon F3-1 (Wolf Gmbh, 2011)

In der Tabelle 5-6 sind die Kennwerte des Kollektors angegeben. Diese müssen in die Maske des Kollektorkataloges eingepflegt werden.

Tabelle 5-6 Technische Daten TopSon F3-1 (Wolf Gmbh, 2011)

Hochleistungs-Flachkollektor	Typ	TopSon F3-1
Länge	A mm	2099
Breite	B mm	1099
Tiefe	C mm	110
Vorlauf-/Rücklauf	D mm	1900
Anschlüsse (flachdichtend mit Überwurfmutter)	G	3/4"
Aufstellwinkel		15° bis 90°
optischer Wirkungsgrad *	%	80,4
Wärmeverlustkoeffizient a_1 *	W/(m ² K)	3,235
Wärmeverlustkoeffizient a_2 *	W/(m ² K)	0,0117
maximale Stillstandtemperatur	°C	194
Einstrahlwinkel-Korrekturfaktor K_{50° *	%	94,0
Wärmekapazität C *	kJ/(m ² K)	5,85
max. Betriebsüberdruck	bar	10
Bruttofläche	m ²	2,3
Aperturfläche	m ²	2,0
Füllinhalt	Ltr.	1,7



Die Kollektoren werden in Polysun mit einem Anstellwinkel von 45° und südlicher Ausrichtung definiert, um eine optimale Ausnutzung der Einstrahlung für den Heizbetrieb zu erreichen. Es werden zu jeder Tages- und Jahreszeit verschattungsfreie Kollektoren angenommen.

5.4.4 Erdsonde

In Polysun kann eine Vielzahl an Parametern für Erdwärmesonden definiert werden. Beispielsweise können bis zu zehn verschiedene Erdschichten für ein Sondenbohrloch ausgewählt werden. Weiters gibt es Möglichkeiten zur Veränderung der Bohrlochtiefe, Anzahl und Durchmesser der Erdsonden sowie deren Abstand usw.

Für dieses Projekt wurde eine Erdsonde definiert, die eine jährliche Entzugsenergie von 13000 kWh zulässt. Die Dimensionierung erfolgte nach den Unterlagen der Fa. Wolf (Wolf GmbH, 2011). Die Berechnung ist im Anhang zu finden. Die genaue Parametrierung kann der

Tabelle 5-7 entnommen werden.

Tabelle 5-7 Kennwerte der Erdsonde

Erdwärmesonde	25 mm Doppel-U-Sonde
Bodenerwärmung (ΔT zwischen T_{Luft} und $T_{\text{Erdoberfläche}}$)	0.8 K
Axialer Temperaturgradient	0,03 K/m
Sondenlänge	65 m
Sondenabstand	6,5 m
Anzahl Erdwärmesonden	2
Hinterfüllung	Bentonit
Anzahl Erdschichten	1
Erdschicht	Mittelsandstein OMM
Sondenvorlaufdauer	4 Jahre
Jährliche Entzugsenergie der Sonde während der Sondenvorlaufsimulation	13000 kWh

5.4.5 Komponenten Pumpen

In den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“ werden fünf Kreisläufe benötigt, um die Wärme transportieren zu können und somit werden auch fünf verschiedene Pumpen benötigt, um die Kreisläufe anzutreiben. Diese sind:

- Solarkreispumpe
- Solekreispumpe
- Speicherbeladungspumpe
- Pumpe für Frischwassermodul
- Heizkreispumpe

In der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ wird aufgrund der fehlenden Solarthermischen Anlage keine Solarkreispumpe benötigt. Der Einsatz eines Trinkwasserspeichers ermöglicht den Wegfall der Frischwasserstation und somit einer weiteren Pumpe. Zusätzlich wird für den Heizkreis auf eine eigene Pumpe verzichtet. Durch

umschalten eines 3-Wegeventils wird die Durchströmung des Heizkreislaufs mit Hilfe der Ladepumpe ermöglicht.

Polysun bietet eine Vielzahl von Pumpen verschiedener Hersteller zur Simulation an. Zur Auswahl der Solekreispumpe und Ladepumpe wurden die Angaben aus den Datenblatt der gewählten Wärmepumpe herangezogen. Diese Kreisläufe benötigen hohe Volumenströme, was höhere Leistungsanforderungen für die Pumpen zur Folge hat. In

Tabelle 5-8 ist angegeben, welche Pumpe für den jeweiligen Kreislauf gewählt worden ist

Tabelle 5-8 Übersicht der verwendeten Pumpen

Kreislauf	Pumpe
Solarkreislauf	Hocheffizienzpumpe mit 40W Nennleistung aus Polysunkatalog
Solekreislauf	Wilo Statos Para 25/1-7 65W Nennleistung
Speicherladekreislauf	Wilo Tec RS 25/7 60W Nennleistung
Frischwassermodul	Hocheffizienzpumpe mit 40W Nennleistung aus Polysunkatalog
Heizkreislauf	Hocheffizienzpumpe mit 40W Nennleistung aus Polysunkatalog

6 Simulation mit Polysun

In diesem Kapitel ist das Vorgehen bei der Erstellung einer Jahressimulation des Energiebedarfs und Versorgung eines Gebäudes mit Hilfe der Software Polysun Version 5.8 (Vela Solaris AG, 2012) beschrieben. Es wird von der Erstellung lauffähiger Projekte bis hin zur detaillierten Beschreibung des Regelungssystems erklärt, wie die zu vergleichenden Anlagenvarianten aufgebaut wurden. Eine Auswertung der Simulationsergebnisse folgt im Kapitel 7.

6.1 Vordefinierte Vorlagen als Ausgangssituation

Polysun berechnet die Werte in Stundenschritten. Tritt ein Problem bei der Berechnung auf, verkleinert Polysun die Rechenschritte. Die Berechnung in Polysun kann auch auf sehr schnellen Rechnern sehr lange Zeit in Anspruch nehmen. Der Grund dafür kann eine falsche Dimensionierung von Komponenten sein. Um die Simulationsdauer in Grenzen zu halten, empfiehlt Vela Solaris, vordefinierte Systeme als Vorlage zu übernehmen. Diese sollen dann immer geringfügig abgeändert werden. Somit können Änderungen, die lange Rechenzeiten zur Folge haben, wieder leicht korrigiert werden (Polysun 5.8, 2012).

Bei der Erstellung der ersten Simulationsversuche, traten häufig Probleme dieser Art auf. Die Simulationszeiten betragen bis zu einer $\frac{3}{4}$ Stunde. Teilweise wurden die Simulationen nicht zu Ende geführt und mussten dann manuell abgebrochen werden. Übliche Jahressimulationszeiten von Systemen in Polysun liegen innerhalb von wenigen Minuten.

Einen weiteren nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Simulationszeiten haben selbst definierte Komponenten. Vor allem Speicher können die Dauer der Berechnung deutlich verlängern. Durch Variation der Regelparameter konnte ich feststellen, dass die Steuerung auch einen großen Einfluss auf die Berechnungszeit hat.

Werden aber die Hinweise aus dem ersten Absatz befolgt lässt sich mit etwas mehr Zeitaufwand eine stabile Simulation erstellen. Die Berechnungszeiten der in dieser Arbeit untersuchten Systeme lagen zwischen 250-350 Sekunden. Die verwendete Hardware war:

- **Prozessor:** Centrino Duo 2 x 1,66GHz
- **Arbeitsspeicher:** 2 x 1GB
- **Betriebssystem:** Windows XP SP3

Ein großer Vorteil bei der Arbeit mit Polysun war die Tatsache, dass der Prozessor des verwendeten Laptops über 2 Kerne verfügt. Ein Kern wurde vollständig vom Simulationsprogramm eingenommen. Der zweite war nicht so stark belastet und ließ andere Arbeiten parallel zur Simulation zu. Simulationsversuche mit einem 1-Kern Prozessor haben gezeigt, dass die Berechnung alle Leistungsressourcen benötigt, und der Rechner während dieser der Simulationszeit nicht mehr für andere Tätigkeiten verwendet werden kann.

6.2 Definition der simulationstechnischen Randbedingungen

In diesem Abschnitt sollen die Randbedingungen der Simulation erläutert werden. Unter Randbedingungen soll der Standort, das Gebäude sowie das Benutzerverhalten verstanden werden.

Polysun bietet bei der Erstellung eines neuen Projekts einen Wizard an, in dem man alle Daten zur Definition der Randbedingungen eingeben kann.

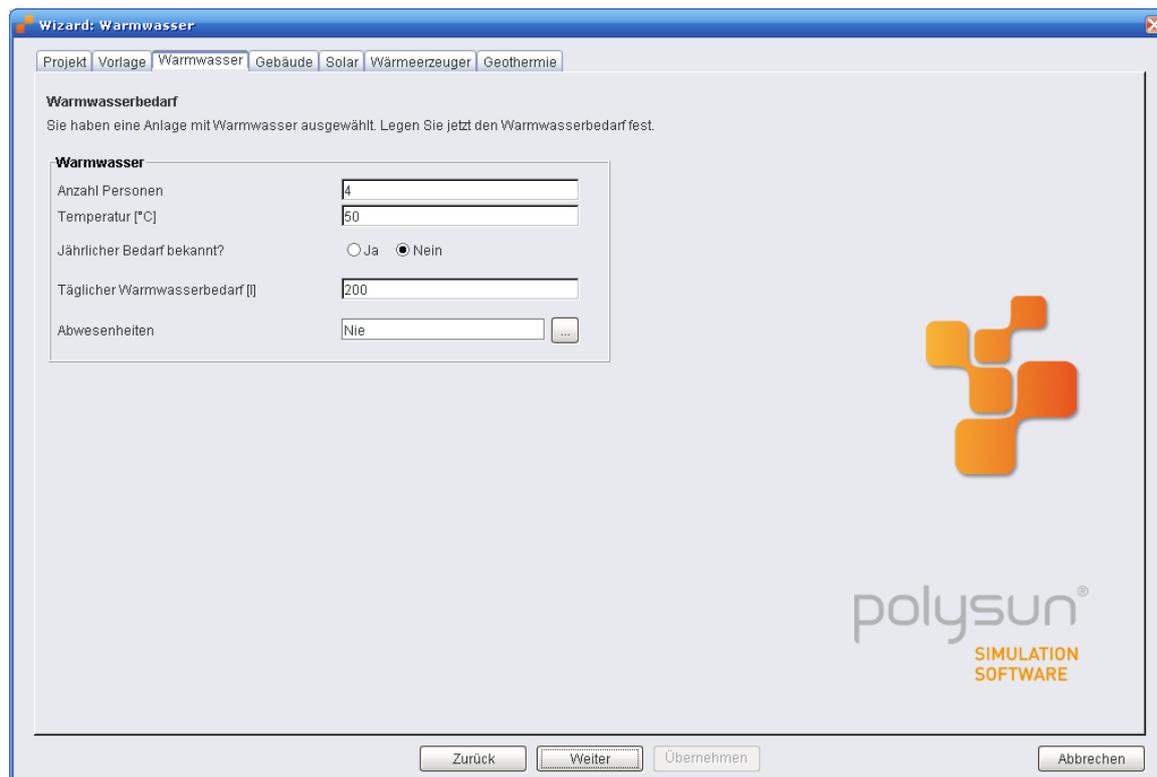


Abbildung 6-1 Wizard Maske bei der Erstellung eines neuen Projekts in Polysun (Vela Solaris AG, 2012)

Wie man aus Abbildung 6-1 erkennen kann werden Daten zum Standort, Warmwasserbedarf, Gebäudezustand, Solaranlage und zum Wärmeerzeuger abgefragt. Hier wurden die Daten eingetragen aus Kapitel 5.1 eingetragen. Diese Angaben reichten aber nicht vollständig aus. Um detailliertere Angaben machen zu können, muss die jeweilige Komponente ausgewählt und deren Eigenschaften bearbeitet werden. Beispielsweise kann beim Warmwasserbedarf ein Zapfprofil angegeben werden. Hier alle Funktionen aufzuzählen würde den Rahmen sprengen und ist auch nicht das Ziel dieser Diplomarbeit. Für eine detailliertere Beschreibung kann die Benutzerdokumentation von Polysun herangezogen werden.

In den folgenden Abschnitten sind die Daten angegeben die für die zu vergleichenden Systeme verwendet worden sind, und für beide gleichermaßen gelten.

6.2.1 Standort

Als Standort wurde Freising in der Nähe des Münchner Flughafens gewählt, da ein Datensatz für diesen Standort in Polysun existiert. Es ist zwar möglich jeden beliebigen Standort zu wählen. Diese Wetterdaten werden aber mit den Daten der umliegenden Standorte bei denen ein Wetterdatensatz vorhanden ist interpoliert. Um eine rekonstruierbare Simulation zu erstellen ist somit dieser Standort mit eigenem Wetterdatensatz gewählt worden. In Tabelle 6-1 sind die Daten des Standortes angegeben:

Tabelle 6-1 Daten des Standorts

Längen-grad [°]	Breiten-grad [°]	Höhe ü. Meeresspiegel [m]	Norm Außentemperatur [°C]	Solare Einstrahlung auf die Horizontale [kWh/m ²]	Mittlere Außen- temperatur [°]	Gradtag- zahl/ Heiztage
48,2	11,5	448	-15	1150	9	3867/266

Die Wetterdaten für diesen Standort sind in Stundenschritten in einer Datenbank hinterlegt und stützen sich auf langjährige Mittelwerte.

Die Temperatur des Kaltwassers an diesem Standort wurde jahreszeitabhängig definiert und bewegt sich nach den Ergebnissen der Simulation zwischen 8 und 13 °C.

6.2.2 Gebäude

Es gibt die Möglichkeit, in Polysun die Gebäude in folgenden Formen einzugeben. Wenn der Energiebedarf nicht bekannt ist kann, in Polysun ein Gebäude aus einer Datenbank ausgewählt werden. Diesem Gebäude sind Eigenschaften hinterlegt, aus denen sich durch die Eingabe mehrerer Parameter der Jahresenergiebedarf berechnet.

Es gibt aber auch die Möglichkeit, ein Gebäude hinsichtlich des Energieverbrauchs selbst zu definieren. Diese Art der Parametrierung wurde von mir genutzt. Die Angaben sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst:

Tabelle 6-2 Gebäudeeigenschaften

Heizwärmebedarf ohne WWB	7500 kWh
Wärmeverluste (Transmission + Lüftung)	18750 kWh
Beheizte/gekühlte Wohnfläche	150 m ²
Jährlicher spezifischer Heizwärmebedarf	50 kWh/m ² a
Soll-Raumtemperatur	20 °C

6.2.3 Warmwasser

Der Bedarf an Warmwasser richtet sich nach der Anzahl der Personen die im Haushalt wohnen, sowie an der Solltemperatur des Warmwassers. Eine Person verbraucht durchschnittlich 50 l/d warmes Wasser bei 50 °C. Abgesehen von der Warmwassersolltemperatur kann in Polysun das Benutzerverhalten noch mithilfe eines Zapfprofils verändert werden. In Tabelle 6-3 sind die Angaben zum Warmwasser dargestellt.

Tabelle 6-3 Warmwasserprofil

Gewähltes Tagesprofil	Abendspitze
Durchschnittlicher Volumenentnahme	200 l/d
Jahresenergiebedarf	3500 kWh
Warmwasserzirkulation	nein
Warmwassertemperatur	50 °C
Kaltwassertemperatur	Jahreszeitabhängig 8–13 °C

Das Zapfprofil eines Tages wird als Entnahmemenge pro Stunde aufgelistet. Das gewählte Zapfprofil Abendspitze bedeutet, dass in den Abendstunden der größte Anteil der 200 l/d gezapft wird. Allerdings simuliert Polysun die Entnahme nicht gleichmäßig über eine Stunde verteilt, sondern die Entnahme wird am Beginn einer jeden Stunde mit dem definierten Nenndurchsatz berechnet. Die Entnahmemenge und der Nenndurchfluss bestimmen die Dauer der Entnahme.

6.3 Die Anlagen im Überblick

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der im Kapitel 5.2 vorgestellten Anlagenvarianten mit deren hydraulischen Schemen beschrieben.

Bei allen drei Anlagenvarianten wird das Gebäude mit Fußbodenheizungen erwärmt. Diese haben den Vorteil, dass im Vergleich zu Radiatoren geringere Vorlauftemperaturen benötigt werden. Durch die geringeren Vorlauftemperaturen kann die Wärmepumpe effizienter betrieben werden.

Die Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“ (Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4) bestehen aus fünf hydraulischen Kreisläufen. Diese sind:

- Warmwasserkreislauf
- Heizkreislauf
- Wärmeerzeugerkreislauf
- Solekreislauf
- Solarkreislauf

Die Fußbodenheizung kann im Simulationsprogramm aus einem Katalog ausgewählt werden. Die Vor- und Rücklauftemperaturen sind fest vorgegeben (unabhängig von der Außentemperatur), und betragen 35 bzw. 25 °C.

6.3.1 Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“

Der Hauptunterschied der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ zu den beiden anderen Anlagenvarianten liegt darin, dass hier kein Solarkreislauf vorhanden ist. Daraus ergeben sich auch Unterschiede für die Speicher und die hydraulische Verschaltung. Da der Heizkreislauf direkt in den Wärmepumpen-Ladekreis eingebunden ist, wird als Speicher nur ein Trinkwasserspeicher benötigt, der von der Wärmepumpe erwärmt wird. Der Speicher ist notwendig, da die Leistung einer Wärmepumpe nicht ausreicht, um das Warmwasser direkt bei Bedarf zu erwärmen. Die Regelung kann durch Umschalten eines 3-Wegeventils entscheiden, ob der Trinkwasserspeicher beladen, oder der Heizkreis aktiviert wird. Die Wärmepumpe benutzt als Wärmequelle einen Solekreislauf, der eine Erdsonde durchströmt und dabei dem Erdreich Energie entzieht.

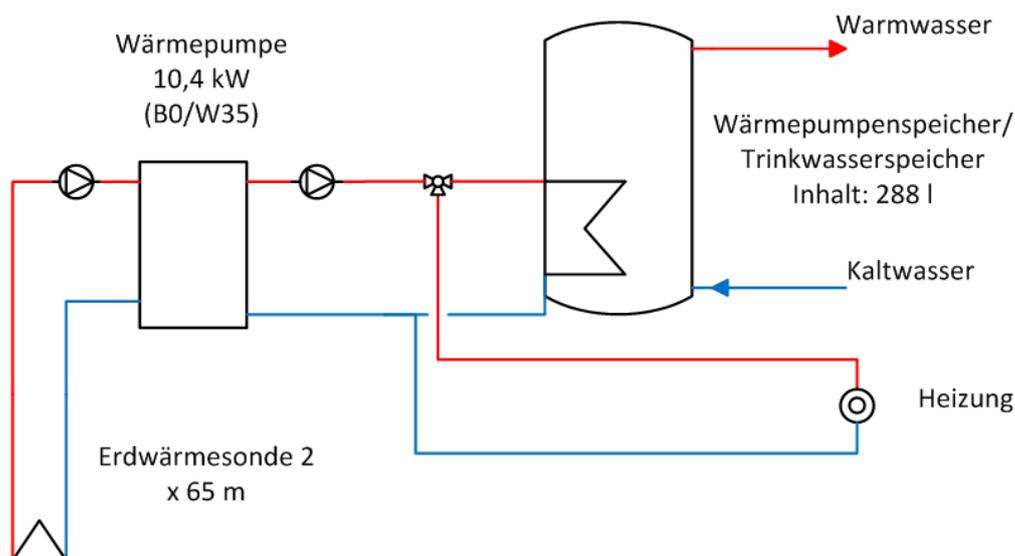


Abbildung 6-2 Schema Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“

6.3.2 Anlagenvariante „Wolf“

Die Anlagenvariante „Wolf“ zeigt die Verschaltung einer Heizungsanlage mit heizungsunterstützender Solaranlage und einer Wärmepumpe, wie sie aktuell auch von der Fa. Wolf vertrieben wird. Die Solaranlage stellt der Wärmepumpe **keine** Wärme quellenseitig zur Verfügung.

Zur **Warmwasserbereitung** ist an den Kombispeicher eine Frischwasserstation angeschlossen. Die Hauptkomponente dieser Einheit ist ein Plattenwärmetauscher, welcher auf der Primärseite mit Warmwasser aus dem Kombispeicher mit Hilfe einer Pumpe durchströmt wird. An der Sekundärseite ist das Kaltwasser angeschlossen, das durch den Vordruck des Wasserversorgers durch den Plattenwärmetauscher strömt und dabei erwärmt wird.

Der **Heizkreislauf** besteht aus einer Beimischschaltung. Das warme Heizungswasser im unteren Bereich des Speichers wird auf eine definierte Temperatur heruntergemischt und durchströmt mit Hilfe der Heizkreispumpe die Fußbodenheizung.

Um den Speicher auch bei fehlendem solarem Ertrag zu beladen, ist der **Wärmeerzeugerkreislauf** notwendig. Er besteht aus einer Pumpe, welche in diesem Fall im Wärmepumpengehäuse verbaut ist, und zwei Wegeventilen sowie deren Verrohrung. Der Kreislauf bezieht seine Energie vom Kondensator der Wärmepumpe. Die Wegeventile können so angesteuert werden, dass entweder der Warmwasserbereich oder der Heizungswasserbereich (siehe Abbildung 5-2) des Speichers beladen wird.

Die Wärmepumpe benötigt Wärme, die sie auf höheres Temperaturniveau bringen kann. Dafür ist der **Solekreislauf** verantwortlich, welcher die Erdsonde durchströmt und dabei Erdwärme aufnimmt. Diese Wärme lässt das Kältemittel im Verdampfer der Wärmepumpe verdampfen. Wie auch beim Wärmeerzeugerkreislauf ist auch die Solekreispumpe im Gehäuse der Wärmepumpe untergebracht.

Der **Solarkreislauf** hat die Aufgabe, die im Kollektor durch die Sonneneinstrahlung erzeugte Wärme zum Speicher zu transferieren. Damit die Wärme des Kollektors in die dafür vorgesehenen Bereiche für Warmwasser und Heizungsunterstützung des Speichers gelangen kann, wird zusätzlich zur Pumpe noch ein Wegeventil verbaut. Mit diesem hat die Regelung die Möglichkeit je nach Bedarf den oberen Wärmetauscher des Speichers zu durchströmen, und damit warmes Pufferwasser zu erzeugen welches zur Brauchwasserbereitung entnommen werden kann. Alternativ kann der untere Wärmetauscher durchströmt werden und trägt damit zur Heizungswassererwärmung bei.

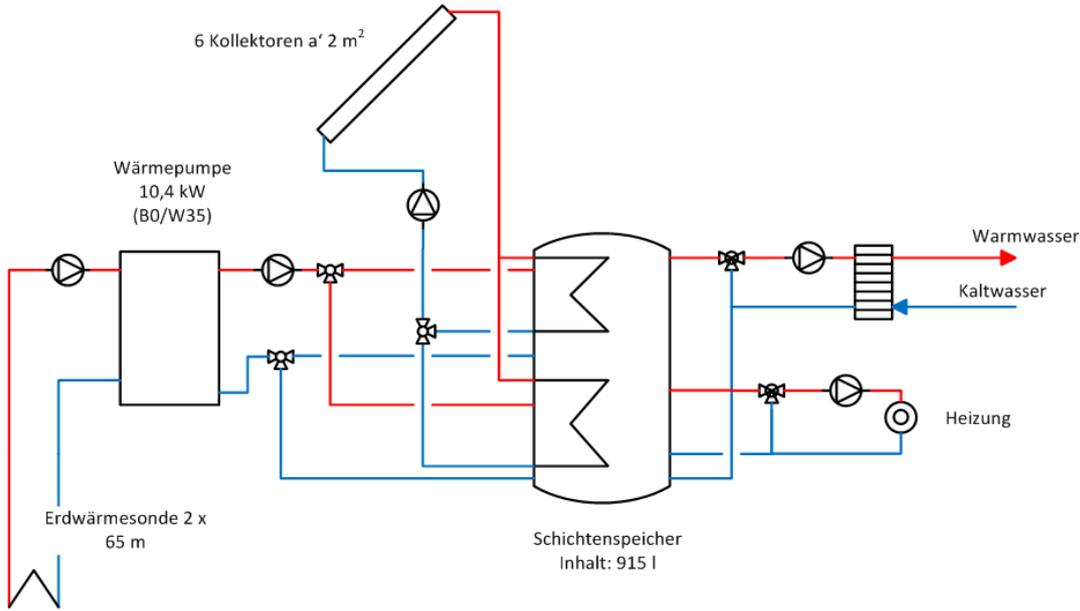


Abbildung 6-3 Hydraulikschema Anlagenvariante „Wolf“

6.3.3 Anlagenvariante „Kombination“

Diese Anlagenvariante unterstützt die Funktion einer Quellentemperaturanhebung der Wärmepumpe durch einen Pufferspeicher und ist aus konstruktiv unveränderten Komponenten der Fa. Wolf aufgebaut.

Der Warmwasserkreislauf, Heizkreislauf und Wärmeerzeugerkreislauf sind ident mit denen der Anlagenvariante „Wolf“. Der wesentliche Unterschied ist, dass ein zusätzlicher Speicher als Schnittstelle zwischen Solaranlage und Wärmepumpenquellenseite dient. Um diesen Speicher solar beladen zu können, werden zusätzlich zwei 3-Wegeventile im Solarkreislauf benötigt.

Auch auf der Soleseite wird ein zusätzliches 3-Wegeventil benötigt welches das Umschalten zwischen den beiden Wärmequellen (Speicher/Erdsonde) ermöglicht. Wie auch schon im Absatz 4.3.2 erwähnt, resultiert aus diesen Maßnahmen eine wesentlich komplexere Regelung welche im Kapitel 0 beschrieben ist.

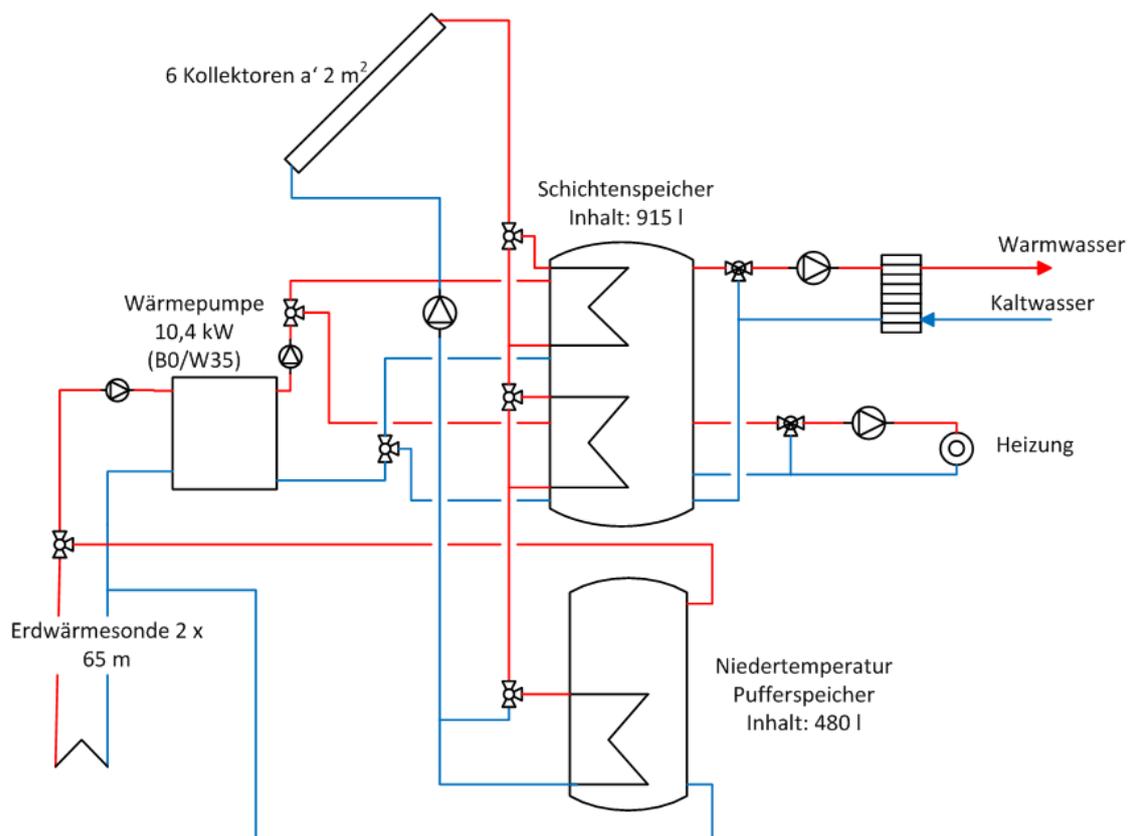


Abbildung 6-4 Hydraulikschema Anlagenvariante

6.4 Regelstrategie in Polysun

Wie im Abschnitt 5.3 beschrieben, bietet Polysun nur sehr begrenzt die Möglichkeit an, eine individuelle Regelung zu entwerfen. Die Auswahl der Regelung beschränkt sich auf 10 vordefinierte Steuerungen, die geringfügig in ihrer Logik angepasst werden können. Die Ein- und Ausgänge sind hinsichtlich der physikalischen Größe und der Anzahl fest vordefiniert und können lediglich benutzt oder nicht benutzt werden. Die Möglichkeit einer Erweiterung gibt es nicht.

Die Steuerung der Anlagenvariante „Wolf“ kann mit den in Polysun angebotenen Regelungsvarianten problemlos realisiert werden. Bei der Nachbildung der Anlagenvariante „Kombination“ muss eine Regelung gefunden werden, die unterscheiden kann, ob es mehr Sinn macht die solare Wärme in den Kombispeicher oder in den Niedertemperaturspeicher zu leiten.

Die theoretisch betrachtete Antwort auf diese Frage ist im Kapitel 4.5.1 beschrieben. Eine Regelung, die in Abhängigkeit von Einstrahlung, Temperaturen und Kollektorparametern Schaltzustände unterscheiden kann, kann nicht mit Polysun nachgebildet werden.

6.4.1 Vorlage mit ähnlichen Anforderung an die Regelung

Es werden einige Systeme als Vorlagen angeboten, die beide Systeme (Sole/Wasser Wärmepumpe und Solarthermie) verwenden. Eines dieser Systeme verwendet das Prinzip der Erdreichregeneration, um eine bessere Ausnutzung der auf die Kollektoren eingestrahlten Sonnenenergie zu gewährleisten. In Abbildung 6-5 ist die Vorlage „25e“ von Polysun dargestellt.

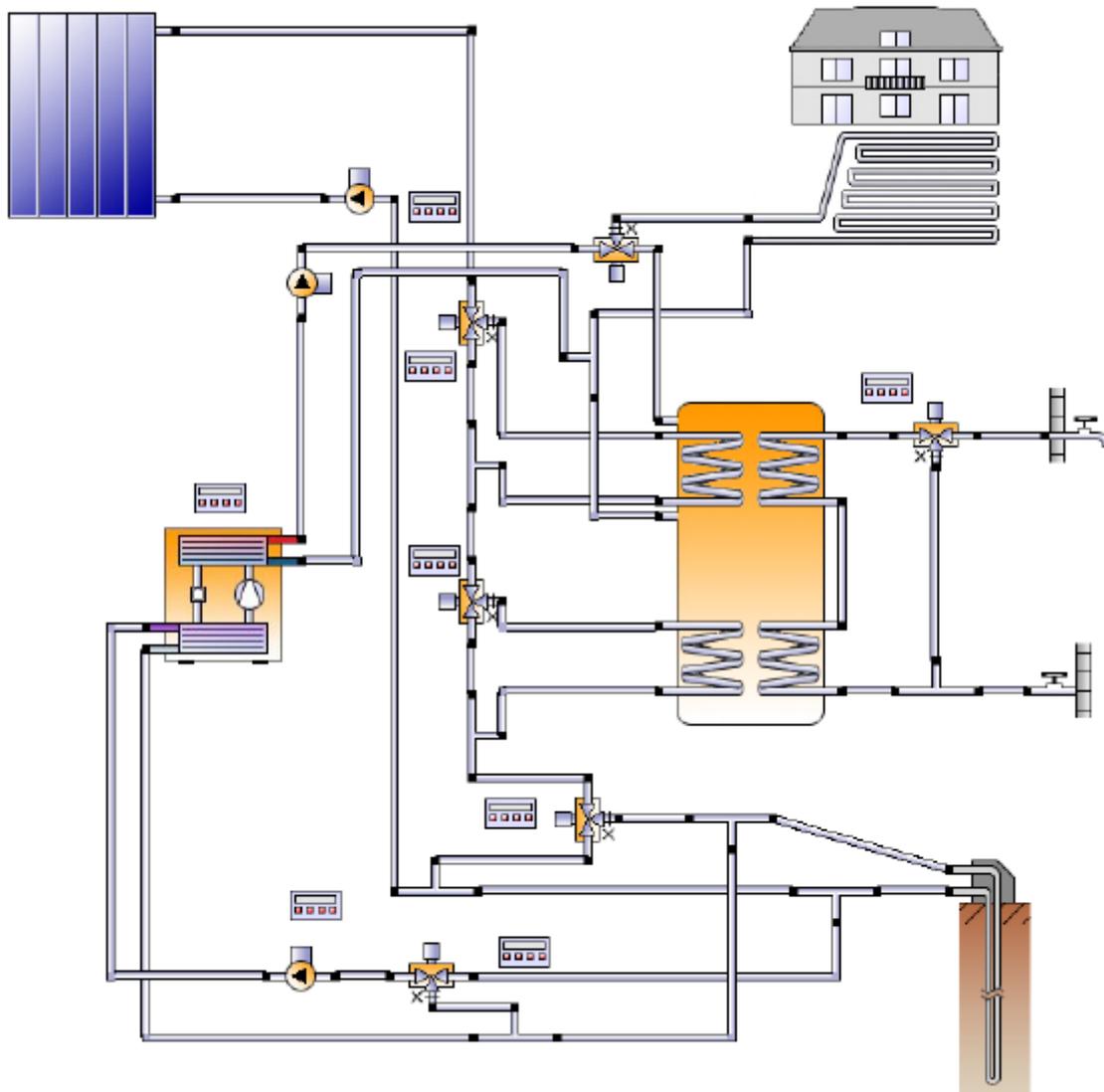


Abbildung 6-5 Vorlage 25e von Polysun (Vela Solaris AG, 2012)

Diese Regelung funktioniert im Detail folgendermaßen:

Die Schaltventile im Solarkreis vor dem Speicher können entscheiden, ob die Temperatur der vorbeiströmenden Solarflüssigkeit ausreicht, um den Speicher im jeweiligen Bereich zu erwärmen.

Ist der Speicher im oberen Bereich vollständig aufgeladen oder die Temperatur der Solarflüssigkeit zu gering um den unteren Bereich des Speichers zu beladen, wird das Schaltventil geöffnet, um die Sonde zu durchströmen und damit zu regenerieren. Die Priorität liegt so bei der solaren Beladung des Kombispeichers.

Die Solarpumpe schaltet ein, wenn die Kollektoraustrittstemperatur 6K größer als die Temperatur im Rohr vor der Pumpe ist. Dieses Rohr wird unabhängig von der Schaltstellung der Schaltventile immer durchströmt, und zeigt somit die geringste Temperatur im Kreislauf an. Ein Nachteil dieser Steuerung ist, dass sich das Rohr bei Stillstand der Solarpumpe an die Raumtemperatur angleicht, und damit nicht die Temperatur im Speicher bzw. im Erdreich repräsentiert. Ziel dieser Anlage ist es erst das Erdreich zu beladen wenn der Speicher vollständig beladen ist. Daher kann als Einschalttemperatur der Solarkreispumpe nicht das Erdreich herangezogen werden. In diesem Fall wäre der Solarkreis im Betrieb, aber weder die Schaltbedingungen für den Speicher (Kollektoraustrittstemperatur zu gering) noch die Schaltbedingung um das Erdreich zu beladen (Speicher ist nicht vollständig beladen) sind erfüllt.

Die Pumpe wird mit einer Hysterese-Schaltung angesteuert. Diese ist in Tabelle 6-4 gezeigt.

Tabelle 6-4 Hysterese-Schaltung der Solarpumpe

Solarpumpe ein	Kollektorfühlertemperatur ab 6 K größer als Temperatur im Rohr vor Pumpe
Solarpumpe aus	Kollektorfühlertemperatur weniger als 2 K über der Temperatur im Rohr vor Pumpe

Auch die Schaltventile werden mit der gleichen Hysterese gesteuert. Die beiden Temperaturen, welche die Temperaturdifferenzen für die Hysterese bilden, sind jeweils die Temperatur im Rohr vor dem Schaltventil und die Speichertemperatur auf Höhe des Wendelwärmetauschers welcher vom Schaltventil angesteuert wird.

Da die Temperatur im Rohr vor der Solarpumpe und nicht die Betriebsmodus-abhängige Temperatur im Speicher bzw. im Erdreich als Einschaltparameter für die Solarkreispumpe dient, kann von der vorgestellten Regelung behauptet werden, sie nicht das ganze Potential der Anlage ausschöpfen kann. Es scheint allerdings so, dass diese Art der Regelung die beste Möglichkeit ist um ein solches System in Polysun effizient zu simulieren.

6.5 Regelung der simulierten Systeme

6.5.1 Warmwasserkreislauf

Das Warmwasser in den **Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“** wird durch ein Frischwassermodul erzeugt. Die Regelung erfolgt einerseits über ein Mischventil das die gewünschte Warmwassertemperatur plus 5 K Temperaturanhebung bereitstellt. Die Temperaturanhebung ist notwendig, um die erforderliche Temperaturspreizung zwischen Primär- und Sekundärkreislauf des Plattenwärmetauschers zu gewährleisten. Andererseits ist die Pumpe drehzahlgesteuert und fördert genau so viel warmes Wasser in den Wärmetauscher um auf der Sekundärseite die erforderliche Solltemperatur bei Nenndurchfluss zu erreichen.

In der **Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“** ist kein Frischwassermodul vorhanden, da das Warmwasser direkt aus dem Trinkwasserspeicher entnommen werden kann. Die Wärmepumpe belädt den Speicher wenn die Temperatur unter der eingestellten Warmwassersolltemperatur fällt und stoppt die Beladung bei einer Erhöhung um 2 K.

6.5.2 Heizkreislauf

Der Heizkreislauf in den **Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“** ist ein typischer geregelter Kreislauf zur Raumwärmeversorgung. Die Vorlauftemperatur wird von der Fußbodenheizung vorgegeben. Diese wird vom Mischventil aus dem Speicherwasser und dem Rücklauf zusammengemischt. Der Durchsatz den die Pumpe erzeugen muss, wird aus der Summe des Nenndurchfluss aller Fußbodenheizungen bestimmt.

In der **Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“** wird der Heizkreislauf durch ein 3-Wegeventil mit der Wärmepumpe verschaltet. Die Wärmepumpe geht bei Bedarf in Betrieb, und erwärmt das Gebäude mit Hilfe der Fußbodenheizungen.

In allen Anlagenvarianten ist die Vorlauftemperatur mit 35 °C durch die von Polysun zur Verfügung gestellte Fußbodenheizung vordefiniert, und lässt sich nicht als Funktion der Außentemperatur angeben. Die Rücklauftemperatur wird mit 25 °C simuliert..

6.5.3 Wärmeerzeugerkreislauf

Bei der **Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“** wird der Trinkwasserspeicher von der Wärmepumpe beladen, wenn die Temperatur unter die eingestellte Warmwassersolltemperatur fällt und stoppt die Beladung bei einer Erhöhung um 2 K.

Die Wärmepumpe in den **Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“** läuft an, wenn die Temperatur im Speicher im Brauchwasserbereich oder im Heizwasserbereich den Sollwert

unterschreitet. Die Schaltventile sind so angeordnet, dass sie immer ein Anschlusspaar (Brauchwasser-, Heizwasserbeladung) schalten. Die Solltemperaturen werden von der Warmwassersolltemperatur, bzw. von der Soll-Vorlauftemperatur der Raumheizung bestimmt.

6.5.4 Solekreislauf

In den **Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ und „Wolf“** wird die Erdsonde mit einem von der Wärmepumpe vorgegebenen Durchsatz durchströmt. Die Pumpe des Solekreislaufs schaltet ein, wenn eine Wärmeanforderung an die Wärmepumpe besteht.

Die **Anlagenvariante „Kombination“** besitzt eine komplexere Schaltung. Zum einen schaltet ein Wegeventil auf die jeweils hinsichtlich der Temperatur günstigere Wärmequelle um. In der Simulation wurde eine max. Soletemperatur am Eintritt der Wärmepumpe von 20°C vorgegeben. Der Grenzwert von 20°C ergibt sich aus der maximalen Temperatur, mit der der Verdampfer angeströmt werden darf. Temperaturen über 20°C verursachen eine Hochdruckstörung und die Wärmepumpe geht auf Stillstand. Um gegebenenfalls eine Störung dieser Art zu vermeiden, muss im Solekreis die Möglichkeit einer Beimischung des abgekühlten Rücklaufes in den Vorlauf gegeben sein.

6.5.5 Solarkreislauf

Die Regelung des Solarkreislaufes in der **Anlagenvariante „Wolf“** schaltet die Solarkreispumpe und ein Wegeventil. Die Steuerung des Wegeventils muss entscheiden, ob das Temperaturniveau im Solarkreislauf hoch genug ist, um den Brauchwasserbereich zu erhitzen. Ist das nicht der Fall, oder hat der Warmwasserbereich bereits 55°C erreicht, durchströmt der Solarkreislauf automatisch der unteren Wendelwärmetauscher im Speicher. Die Pumpe beginnt zu fördern, wenn die Temperatur des Kollektorfühlers die Temperatur des unteren Solarfühlers um 6 K übersteigt. Sie fördert dann so lange, bis die Austrittstemperatur des Kollektors die Temperatur des unteren Solarfühlers bis +2 K unterschreitet. In den Tabellen Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 ist das Regelverhalten nochmals übersichtlich angeführt.

Tabelle 6-5 Regelverhalten der Solarkreispumpe

Solarpumpe ein	Kollektorfühlertemperatur ab 6 K größer als Speicherfühlertemperatur
Solarpumpe aus	Kollektorfühlertemperatur ab 2 K kleiner als Speicherfühlertemperatur

Tabelle 6-6 Regelverhalten des Wegeventils im Solarkreislauf

Beladung Heizungsbereich	Speicherfühler Warmwasserbereich größer 55 °C oder Kollektorausstrittstemperatur kleiner als Speicherfühler Warmwasserbereich
Beladung Warmwasserbereich	Alle anderen Schaltzustände

Übliche Regelsysteme zur solaren Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung sehen es vor, vorrangig den Warmwasserbereich zu beladen. Das bedeutet, dass bei ausreichend hoher Kollektortemperatur der obere Wärmetauscher im Speicher durchströmt werden soll. Fällt das Kollektortemperaturniveau unter die Temperatur des Warmwasserbereichs wird der Heizungsbereich des Pufferspeichers erwärmt. Um zu überprüfen ob während der Beladung des Heizungsbereichs, wieder ein Beladen des Warmwasserbereichs möglich ist, wird der Solarkreislauf nach einer bestimmten Zeit kurzzeitig gestoppt (beispielsweise nach 30 min.). Eine solche Regelung ist mit Polysun nicht möglich. Es wurde daher ein anderes alternatives Regelsystem verwendet. Dieses sieht es vor den Warmwasserbereich bis zu einer definierten Temperatur zu erwärmen und danach die solare Wärme nur über den unteren Wärmetauscher in den Pufferspeicher einzubringen.

Der zweite Speicher in der **Anlagenvariante „Kombination“** stellt ein drittes Temperaturniveau zur Verfügung. Dies bedingt, dass zwei weitere Schaltventile in den Kreislauf eingebaut werden müssen. Der Vorteil besteht nun darin, dass jeder Wendeltauscher separat geschaltet werden kann und die Solarenergie direkt in den Kombispeicher eingebracht wird, ohne dass zwingend der Niedertemperaturspeicher durchströmt wird. So kann bei ausreichender Einstrahlung gewährleistet werden, dass die Wärmepumpe nicht anlaufen muss. Genauso kann bei zu geringer Einstrahlung und daraus resultierenden niedrigen Solarkreistemperaturen nur der Niedertemperaturspeicher beladen werden.

Als Vorlage wurde die im Abschnitt 0 erwähnte Steuerung der Vorlage 25e aus Polysun gewählt. Es wurden einige Änderungen gemacht, um die Steuerung den Anforderungen der kombinierten Variante anzupassen. Durch Simulation verschiedener Konfigurationen konnte herausgefunden werden, dass es am effizientesten ist wenn der Niedertemperaturspeicher in Abhängigkeit von der Einstrahlung beladen wird. Das Schaltventil schaltet bei einer Einstrahlung auf die Kollektorfläche unterhalb von 200 W/m^2 auf die Beladung des Niedertemperaturspeichers. Als Referenztemperatur ist die Temperatur am Wendelwärmetauscher im Niedertemperaturspeicher gewählt worden. Die Solarpumpe läuft erst dann an wenn die Kollektorausstrittstemperatur 6 K über der Temperatur im Niedertemperaturspeicher liegt. D.h. erst wenn der Kollektor durch Sonneneinstrahlung erwärmt wird. Durch die 3-Wegeventile wird der Pufferspeicher erst dann beladen wenn die Solarkreistemperatur die Pufferspeichertemperatur übersteigt.

Diese Regelung nutzt dann die Sonnenenergie aus, wenn diese zu schwach ist, um den Kombispeichers zu beladen (**Betriebsmodus: „nicht direkt nutzbare solare Energie“**). Vor allem im Sommer aber auch in der Übergangszeit kann es vorkommen, dass das solare Angebot ausreicht, um beide Speicher vollständig beladen zu können (**Betriebsmodus: „Überschüssige Solarenergie“**). An solchen Tagen ist der Bedarf an Heizungswärme geringer, sodass die Wärmepumpe kaum beansprucht wird. An den Folgetagen kann bei Schlechtwetter durchaus ein erhitzter Niedertemperaturspeicher von Vorteil sein. Eine Kombination aus beiden Betriebsmodi kann wegen der eingeschränkten Auswahl an Regelsystemen mit Simulationstool Polysun nicht realisiert werden. Der Versuch mehrere Solarkreisläufe zu simulieren, verursachte eine Fehlermeldung von Polysun wegen eines zu komplexen Aufbaus. Die Simulation die nur den Betriebsmodus „Überschüssige Solarenergie“ berücksichtigt, hat aber keine Verbesserung, sondern nur eine Verschlechterung der Effizienz gebracht, wie in Tabelle 6-7 gezeigt ist. Daher wurde nur der Betriebsmodus „nicht direkt nutzbare solare Energie“ simuliert.

Tabelle 6-7 Vergleich des Verbrauchs von elektrischer Energie bei der Anlagenvariante „Kombination“ unter den zwei untersuchten Betriebsmodi.

Energieverbrauch der Verbraucher			
Verbraucher		Anlagenvariante "Kombination"	
		nicht direkt nutzbare solare Energie	Überschüssige Solarenergie
		Wert	Wert
Einheit			
Erdwärmesondenpumpe	kWh/a	57,40	45,90
Frischwasserpumpe	kWh/a	1,20	1,20
Heizkreispumpe	kWh/a	25,10	30,50
Solarkreispumpe	kWh/a	17,00	23,30
WE-Kreispumpe	kWh/a	55,80	45,40
Pumpen gesamt	kWh/a	156,50	146,30
Wärmepumpe aufgenommen	kWh/a	1984,00	1945,00
Gesamter Energieverbrauch	kWh/a	2140,50	2091,30

Der Grund für die größere Energieaufnahme der Wärmepumpe liegt daran, dass der Pufferspeicher bis zu einer Temperatur von 55 °C im Warmwasserbereich und 40 °C im Heizwasserbereich beladen wird. Danach ist die Beladung des Niedertemperaturspeichers freigegeben obwohl das Temperaturniveau am Kollektor ausreicht um den Pufferspeicher weiter zu beladen. Die Speichertemperaturen fallen daher früher unter deren Solltemperatur und es wird eine Beladung von der Wärmepumpe früher angefordert. Obwohl die Wärmepumpe eine höhere Quelltemperatur durch den beladenen Niedertemperaturspeicher zur Verfügung gestellt wird, kann dieser Vorteil das Defizit von solarer Wärme im Pufferspeicher nicht ausgleichen.

7 Energetische Auswertung des Systems

Polysun bietet eine Vielzahl verschiedener Darstellungen der Ergebnisse an. Um zwei Systeme miteinander schnell zu vergleichen, kann die Funktion **Resultate Übersicht** gewählt werden. In einer Tabelle sind mehrere Kennwerte angeführt, die anhand eines Balkendiagramms gegenübergestellt werden.

Will man eine detailliertere Auswertung der Energieflüsse im System, kann man die Option **System-Resultate** wählen. Hier wird aber nur die ausgewählte Variante angezeigt. Ein direkter Vergleich ist nur in der Funktion „Resultate Übersicht“ möglich.

Um in die Berechnungswerte einzelne Komponenten einzusehen, muss die Option **Komponentenresultate** gewählt werden. Sollte diese Ebene noch zu wenig detailliert sein, gibt es noch die Möglichkeit sich die tabellarische Auswertung anzeigen zu lassen. In dieser sind alle Werte in Stundenschritten angegeben.

Das **Energieflussdiagramm** zeigt die Energieflüsse in das System und wie sie im System verwendet werden bzw. welcher Verlust entsteht. Zusätzlich wird gezeigt, in welchem Verhältnis der Bilanzfehler zum Gesamtenergieumsatz steht.

Polysun bietet für den direkten Vergleich von zwei Systemen nur eine grobe Übersicht an. Will man detailliertere Ergebnisse vergleichen, beispielsweise die Arbeitszahl der Wärmepumpe, hat man noch die Möglichkeit diese Daten in einem Textdokument **tabellarisch** abzuspeichern zu. Dieses Textdokument kann dann als externe Datenquelle in MS Excel eingebunden werden.

Sehr aufschlussreiche Ergebnisse kann auch die **grafische Auswertung** geben. Mit ihrer Hilfe können alle Werte, die in der Jahressimulation berechnet worden sind, stundengenau in einem Diagramm abgerufen werden.

In den folgenden Abschnitten werden mit Hilfe von MS Excel die Daten der Simulation ausgewertet. Es wird dabei vor allem auf den Endenergieverbrauch sowie deren Zusammensetzung eingegangen.

7.1 Energetische Bilanz der Anlagenvarianten

Als Energetische Bilanz der untersuchten Systeme, ist die Bilanzierung der Energieflüsse über die Heizsystemgrenzen zu verstehen. In Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 sind diese für die untersuchten Anlagen symbolisch durch Pfeile dargestellt. Die Energieflüsse in das System teilen sich auf in:

- Solarenergie (nur bei Anlagenvarianten: „Wolf“ und „Kombination“)
- Energie der Wärmepumpenquelle
- Elektrische Energieaufnahme der Wärmepumpe
- Energieverbrauch der Pumpen

Dagegen zu stellen sind die Energieflüsse aus dem System. Diese sind:

- Energieverbrauch Warmwasser
- Energieverbrauch Raumwärme
- Verluste an den Innenraum

In der Abbildung 7-1 sind die Energieflüsse in das System und zwischen den Komponenten der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ gezeigt. Die elektrischen Energieströme sind mit blauen Pfeilen gekennzeichnet. Grüne Pfeile deuten den Wärmeenergiefluss in das System an (Gewinne). Bei den Energieströmen aus dem System handelt es sich auch um Wärme, welche mit roten Pfeilen dargestellt sind, und die Verbraucher sowie die Verteilverluste beschreiben.

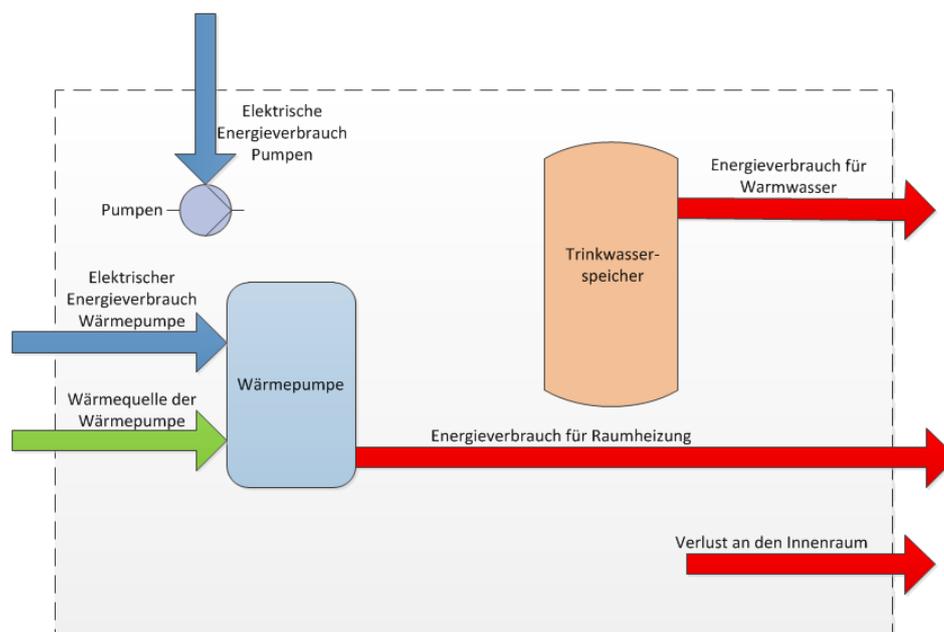


Abbildung 7-1 Energieflüsse Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“

Wie auch schon im Kapitel 0 gezeigt wurde, ist einer der Unterschiede zwischen der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ und den beiden anderen Varianten, dass die Heizung direkt von der Wärmepumpe versorgt wird. Die Anlagenvariante „Wolf“ ist in der Abbildung 7-2 zu sehen, man kann erkennen, dass sowohl der Warmwasserbedarf sowie der Bedarf an Raumheizung aus dem Schichtenspeicher gedeckt werden. Dieser wiederum wird mit Solarenergie bzw. von einer Wärmepumpe beladen.

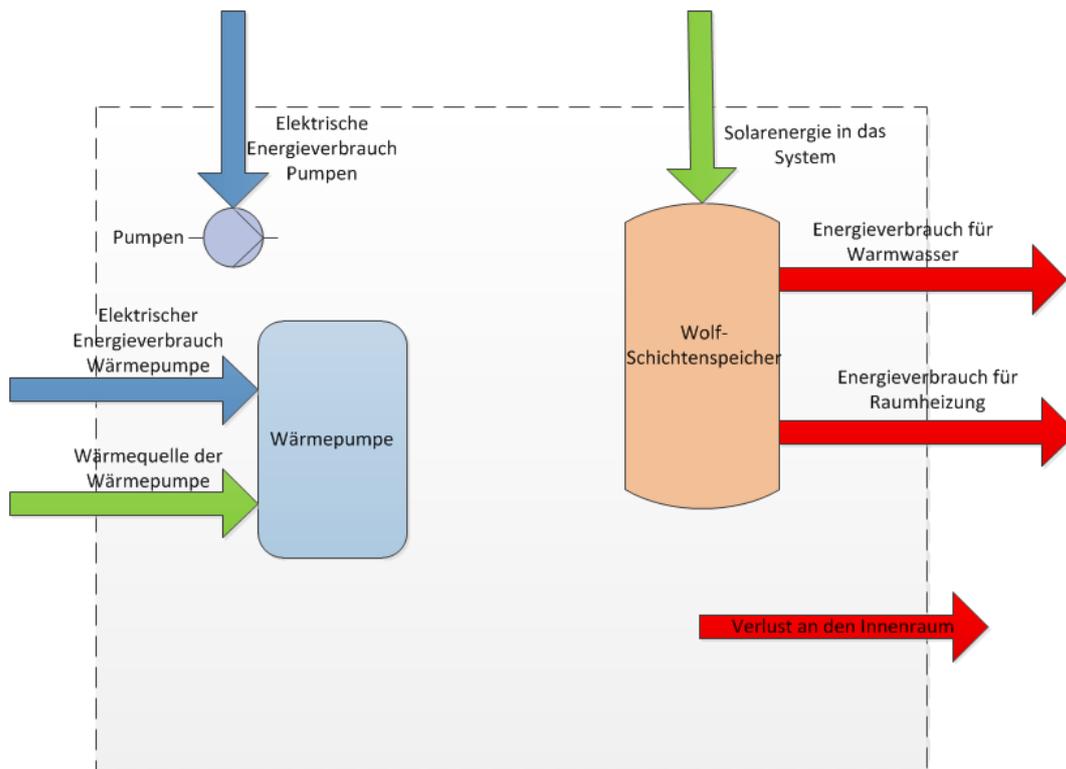


Abbildung 7-2 Energieflüsse der Anlagenvariante „Wolf“

Der Wärmeenergiestrom für die Quelle der Wärmepumpe setzt sich bei der Anlagenvariante „Kombination“ aus der Entzugsenergie der Sonde sowie der Wärmeentnahme aus dem Niedertemperaturspeicher zusammen. Die Polysun-Auswertung mittels Energieflussdiagramm kann diese Energieströme nicht unterscheiden und berechnet die der Wärmepumpe real zugeführte Wärmemenge. Die solare Wärmemenge die dem Niedertemperaturspeicher zugeführt wurde, ist aber bereits als Solarwärme in die Bilanz aufgenommen worden und darf nicht nochmals als Wärmequelle für die Wärmepumpe bilanziert werden. Das Aufrufen des Polysun-Energieflussdiagramms in der Anlagenvariante „Kombination“ verursacht daher einen Fehler. In Abbildung 7-3 werden die Energieflüsse in der Anlagenvariante „Kombination“ veranschaulicht.

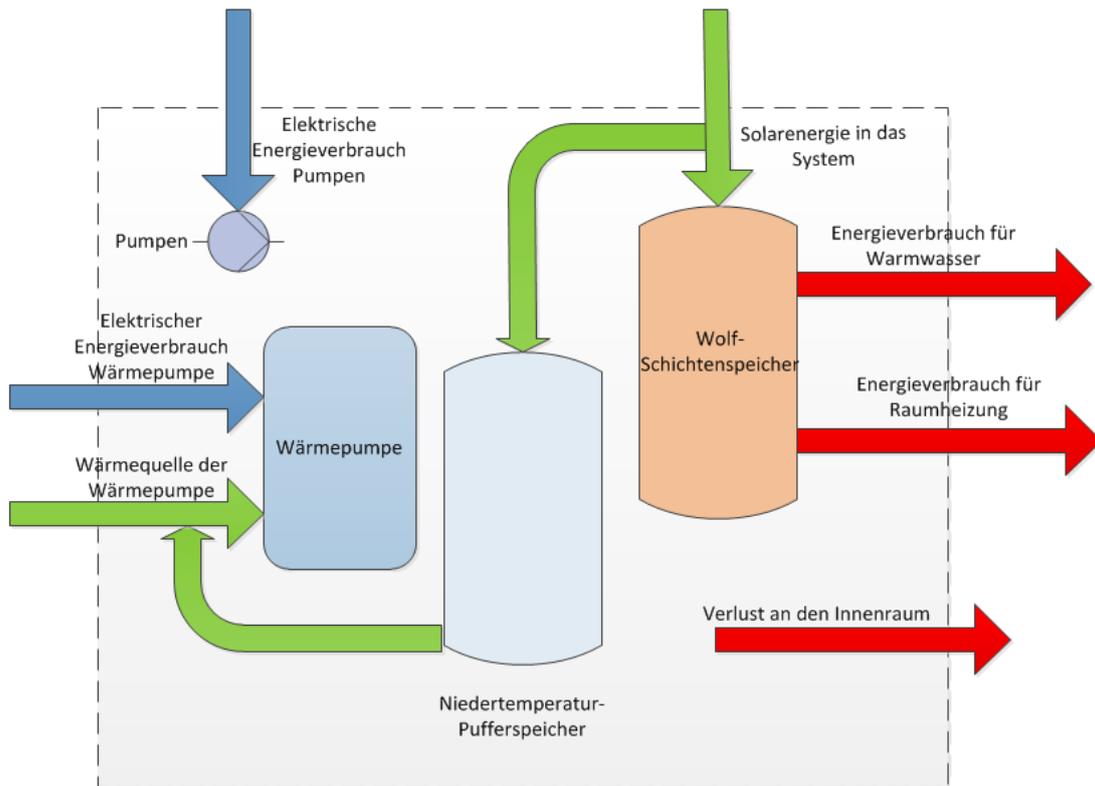


Abbildung 7-3 Energieflüsse über kombinierte Variante

Zur Verifizierung der Anlage sind die Energieströme in einem Excel-Sheet gegenüber gestellt worden. Die Jahreswerte der einleitend gezeigten Energieströme sind in der Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1 Jahreswerte der System-Energiebilanz

	Einheit	Anlagenvariante		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
Solarthermische Energie an das System	kWh/a	-	5785	6886
Wärmequelle Wärmepumpe	kWh/a	8461	5600	4566
elektr. Energieaufnahme Wärmepumpe	kWh/a	3214	2078	1984
Energieverbrauch Pumpen	kWh/a	154	140	157
Summe aller Energieflüsse in das System	kWh/a	11829	13604	13593
Wärmeverbrauch Raumheizung	kWh/a	7427	7405	7400
Wärmeverbrauch Warmwasser	kWh/a	3501	3489	3458
Wärmeverlust an Innenraum	kWh/a	746	2619	2628
Summe aller Energieflüsse aus dem System	kWh/a	11673	13513	13485
Bilanzfehler	kWh/a	156	91	108

Die Aufnahmefähigkeit von solarthermischer Energie kann durch den Einsatz eines Niedertemperaturspeichers erhöht werden. Da aber nur die Sonnenenergie unter 200 W/m^2 Einstrahlung genutzt wird ist der zusätzliche solare Ertrag eher gering. Die dem Erdreich entzogene Wärmemenge kann durch eine solarthermische Anlage erheblich reduziert werden. Die Anlagenvariante „Kombination“ ermöglicht wiederum eine Einsparung der Erdwärmemenge von 18,5 % gegenüber der Anlagenvariante „Wolf“.

Die elektrische Energieaufnahme der Wärmepumpe kann gegenüber dem System ohne Solaranlage erheblich reduziert werden. Allerdings ist die Einsparung zwischen den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“ mit ca. 80 kWh/a nur sehr gering. Eine detaillierte Auswertung des Stromverbrauchs ist im Kapitel 0 zu finden.

Die Energieflüsse aus dem System unterscheiden sich vor allem durch die unterschiedliche Verschaltung der Heizwärmeversorgung. Wegen der direkten hydraulischen Einbindung der Wärmepumpe in Fußbodenheizung, kann das Gebäude effizienter geheizt werden. In den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“ ist ein Speicher mit einem Volumen von 1000 l eingesetzt worden. Dagegen ist in der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ nur ein Trinkwasserspeicher mit 300 l Fassungsvermögen simuliert worden. Wegen der größeren Oberfläche des Pufferspeichers resultieren die wesentlich höheren Verluste an den Innenraum in den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“. Ein weiterer Grund für den vergleichsweise hohen Wärmeverlust an den Innenraum sind vor allem in den Sommermonaten erheblich höheren Temperaturen im System aufgrund der Solarthermischen Unterstützung. Da für alle Systeme das gleiche Gebäude sowie das gleiche Warmwasserprofil angenommen wurde sind der Wärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser ident.

7.2 Elektrischer Energieverbrauch der Anlagenvarianten

Der Bedarf an elektrischer Energie ist das Hauptkriterium zur Beurteilung der untersuchten Systeme, da diese die einzige Endenergieform ist, die von einem Versorgungsunternehmen zu beziehen ist.

Die Verbraucher von elektrischer Energie sind für alle Systeme gleichermaßen die Wärmepumpe und Pumpen zum Umwälzen der einzelnen Kreisläufe. Wie im Kapitel 5.4.2 schon erwähnt, ist in allen Anlagen dieselbe Wärmepumpe mit der gleichen Erdwärmequelle simuliert worden. Bei den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“ sind jeweils eigene Pumpen für den Sole-, Lade- Heiz- Frischwasser- und Solarkreislauf verbaut. Die Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ besitzt keinen Solarkreislauf und daher auch keine dazugehörige Pumpe. Aufgrund eines Trinkwasserspeichers konnte auf ein Frischwassermodul mit integrierter Pumpe verzichtet werden. Außerdem wird der Heizkreislauf nicht mit einer eigenen Heizkreispumpe betrieben sondern kann durch das Umschalten von zwei 3-Wegeventilen direkt mit der Speicher-Ladepumpe versorgt werden. Die Ergebnisse der Jahressimulation sind für die verschiedenen Pumpen in der Tabelle 7-2 angeführt.

Tabelle 7-2 Jährlicher elektrischer Energieverbrauch

		Anlagenvariante		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
Heizkreispumpe	kWh/a	-	24,3	25,1
Frischwasserpumpe	kWh/a	-	1,2	1,2
Solarkreispumpe	kWh/a	-	12,9	17,0
Erdwärmesondenpumpe	kWh/a	82,2	52,2	57,4
Ladekreispumpe	kWh/a	72,1	49,8	55,8
Wärmepumpe aufgenommen	kWh/a	3213,8	2077,5	1984,0
el. Energieaufnahme gesamt	kWh/a	3368,1	2217,9	2140,5

Da die Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ den ganzen Wärmebedarf decken muss, ist der gesamte Stromverbrauch um mehr als 1000 kWh/a größer als jener der Anlagenvarianten mit solarer Unterstützung. Die Erdwärmesondenpumpe hat die gleichen Laufzeiten wie die Ladepumpe und daher auch einen, verglichen mit den anderen beiden Anlagevarianten, hohen Stromverbrauch. Zwischen den Anlagenvarianten mit solarer Unterstützung lässt sich nur ein kleiner Unterschied beim Energieverbrauch der hydraulischen Pumpen erkennen. Dieser ist im Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch verschwindend gering. Insgesamt sind die Werte der Pumpen wegen des Einsatzes von Hocheffizienzpumpen relativ klein.

7.3 Energetische Bilanzierung der Speicher

Um einerseits die Ergebnisse der Polysun Simulation zu validieren und andererseits die Energieströme der simulierten Anlagenvarianten miteinander vergleichen zu können, wurde eine Bilanz der Energieströme um die Speichergrenzen erstellt. Diese können folgendermaßen unterteilt werden.

Die **Energieflüsse in den Speicher** unterscheiden sich grundsätzlich durch den Wärmeerzeuger und für den Zweck, für den die Wärme bereitgestellt wird.

- Solarenergie (bei Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ nicht vorhanden)
 - Warmwasserbereitung
 - Heizungsunterstützung
- Wärmepumpe
 - Warmwasserbereitung
 - Heizwasserbereitung (bei Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ nicht vorhanden)

Die **Energieflüsse aus dem Speicher** können in Nutzenergie und Verluste unterteilt werden.

- Nutzenergie
 - Warmwasser
 - Heizungswasser (bei Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ nicht vorhanden)
- Verluste
 - Speicherverluste über die Oberfläche
 - Anschlussverluste

7.3.1 Energetische Bilanz Trinkwasserspeicher SEW-1-300

Die Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ verfügt im Gegensatz zu den beiden anderen Anlagenvarianten über keine solarthermischen Komponenten. Daher besteht keine Notwendigkeit, einen Puffer für Heizungswasser zu integrieren. Die Versorgung der Fußbodenheizung wird direkt von der Wärmepumpe vorgenommen. Somit setzt sich die energetische Bilanz der Energieströme folgendermaßen zusammen:

Tabelle 7-3 Jahresenergiebilanz des Trinkwasserspeichers in der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“

Energiebilanz des Trinkwasserspeichers in der Anlage "Wärmepumpe Stand-Alone"		
Energiefluss in Speicher	Einheit	Wert
Speicherbeladung durch Wärmepumpe	kWh/a	4006
Anschlussverluste	kWh/a	-181
Wärmeverlust Speicher	kWh/a	-218
Warmwasserbezug aus Speicher	kWh/a	-3607

Die Summe aller Energieströme ergibt null, und daher ist die Simulation des Speichers korrekt. Der Warmwasserverbrauch ist nach dem Simulations-Ergebnis mit ca. 3500 kWh/a um ca. 100 kWh/a geringer als der Warmwasserbezug aus dem Speicher. Diese Differenz ist den Verlusten der Rohrleitung zuzurechnen.

7.3.2 Energetische Bilanz über Pufferspeicher BSP-W-SL-1000

Sowohl für die Anlagenvariante „Wolf“ als auch für die Anlagenvariante „Kombination“ ist der Pufferspeicher BSP-W-SL-1000 eingesetzt worden. Beide Anlagen verfügen über die selbe hydraulische Anbindung des Pufferspeichers und somit können in beiden Varianten dieselben Energieströme in die Bilanz aufgenommen werden. In Abbildung 7-4 sind diese in Form von Pfeilen dargestellt.

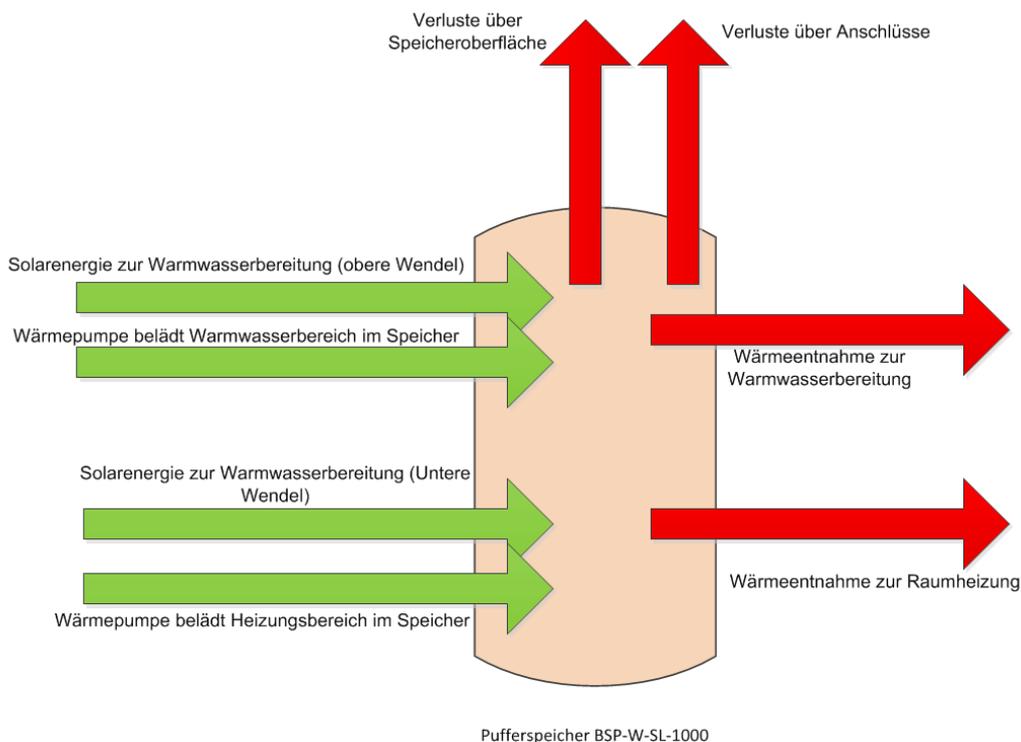


Abbildung 7-4 Energieströme über Pufferspeicher BSP-W-SL-1000 in den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“

Die Resultate für beide Anlagenvarianten sind in der Tabelle 7-4 dargestellt:

Tabelle 7-4 Energiebilanz des Pufferspeichers BSP-W-SL für die Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“

Energiebilanz des Pufferspeichers BSP-W-SL-1000			
		Anlagenvariante	
		Wolf	Kombination
Energiefluss in Speicher	Einheit	Wert	Wert
Energie Solar BW	kWh/a	231,50	526,90
Energie Solar HZ	kWh/a	5197,80	4982,00
Warmwasserbeladung des Speichers durch Wärmepumpe	kWh/a	1201,40	1085,00
Heizwasserbeladung des Speichers durch Wärmepumpe	kWh/a	6352,30	6377,10
Anschlussverluste	kWh/a	-1201,30	-1222,50
Wärmeverlust Speicher	kWh/a	-563,20	-576,20
Warmwasserbezug aus Speicher	kWh/a	-3726,40	-3689,60
Heizungswasserbezug aus Speicher	kWh/a	-7492,10	-7483,50
Bilanzfehler	%	0,00	-0,01

Die in den Speicher eingebrachte solare Wärmemenge ist trotz eines weiteren Speichers in der Anlagenvariante „Kombination“ geringfügig größer, weil der Solarkreislauf in der Anlagenvariante „Kombination“ über drei 3-Wegeventile verfügt, und daher die solare Einbringung effizienter gesteuert werden kann. Dieses Wärmedefizit wird durch die Wärmepumpe ausgeglichen, die deswegen in der Anlagenvariante „Wolf“ mehr Energie in den Speicher einbringen muss. Die Anschlussverluste sowie die Wärmeverluste sind in beiden Varianten annähernd gleich. Auch der Warmwasser- und der Heizwasserbezug weisen keine signifikanten Differenzen auf.

Die Bilanzsumme der Energieflüsse beider Anlagenvarianten lässt keinen Bilanzfehler erkennen, weshalb die Simulation als korrekt angesehen werden kann (Tabelle 7-4). Auch die abgegebene Wärmemenge von den Heizkörpern sowie der Warmwasserbezug sind, bis auf die Leitungsverluste, mit der aus dem Speicher ident. Der Energieverbrauch der Fußbodenheizung sowie der Warmwasserverbrauch ist in Tabelle 7-5 zu sehen

Tabelle 7-5 Jahresenergieverbrauch für Warmwasser und Heizung

Jahresenergieverbrauch			
		Anlagenvariante	
		Wolf	Kombination
Beschreibung	Einheit	Wert	Wert
Warmwasserverbrauch	kWh/a	3489	3458
Heizungsverbrauch	kWh/a	7404	7399
Gesamtverbrauch	kWh/a	10893	10857

Beide Verbräuche sind geringer als der Energiebezug aus dem Speicher. Die Differenz ergibt sich aufgrund der Leitungsverluste der Kreisläufe.

7.4 Auswertung der Wärmepumpe

Aus den Erkenntnissen im Abschnitt 0 resultiert, dass der Großteil des Energieverbrauchs von der Wärmepumpe verursacht wird. Von dieser Tatsache ausgehend kann gesagt werden, dass das größte Einsparungspotential bei der Wärmepumpe liegt.

Im Kapitel 3.2 sind bereits die Grundlagen der Wärmepumpe erläutert worden. Es wurde gezeigt, dass der SPF die Effizienz einer Wärmepumpe über einen bestimmten Zeitraum beschreibt. In der Tabelle 7-6 sind die Werte einer Jahressimulation für alle untersuchten Anlagenvarianten zu sehen. In allen Systemen wurde die gleiche Wärmepumpe, sowie die gleiche Erdsonde verwendet. Das bedeutet dass der SPF hauptsächlich von dem Temperaturniveau für Warmwasser und Heizungsvorlauf (Wärmesenke) bestimmt wird, sowie deren Betriebszeiten, und weniger von den unterschiedlichen Temperaturniveaus im Erdreich.

Tabelle 7-6 Berechnungsergebnisse der Wärmepumpe BWS-1-10 in einer Jahressimulation aller untersuchten Anlagenvarianten

Effizienzvergleich der Wärmepumpe BWS 1-10				
		Anlagenvariante		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
Beschreibung	Einheit	Wert	Wert	Wert
Verbrauch elektrischer Energie	kWh/a	3214	2078	1984
Wärmemenge abgegeben	kWh/a	11675	7678	7588
SPF	-	3,63	3,70	3,82

Die Ergebnisse der Jahressimulation lassen erkennen, dass eine Steigerung der Effizienz der Wärmepumpe durch die Installation einer Solaranlage möglich ist. Das liegt vor allem daran, dass die hohen Temperaturen zur Warmwasserbereitung die Arbeitszahl der Wärmepumpe negativ beeinflussen. Da der Bereich für Warmwasser im Speicher aber vorrangig von der Solaranlage bereitete wird, kann dieser für die Wärmepumpe ungünstige Betriebspunkt über lange Zeit vermieden werden. Vor allem in den Sommermonaten ist der Unterschied der Arbeitszahl markant. In der Tabelle 7-7 sind die monatlichen Arbeitszahlen aller untersuchten Anlagenvarianten dargestellt. In den Monaten in denen keine Arbeitszahl angegeben wurde, ist keine Wärme von der Wärmepumpe abgegeben worden.

Tabelle 7-7 monatliche Wärmepumpen-Arbeitszahlen der untersuchten Anlagenvarianten

Vergleich der Monatsarbeitszahlen				
		Anlagenvariante		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
Monat	Einheit	Wert	Wert	Wert
Jänner	-	3,69	3,67	3,77
Februar	-	3,70	3,68	3,79
März	-	3,70	3,69	3,85
April	-	3,65	3,82	4,06
Mai	-	3,42	3,76	4,13
Juni	-	3,28	3,77	4,15
Juli	-	3,14	-	-
August	-	3,14	2,67	-
September	-	3,46	3,62	3,77
Oktober	-	3,68	3,70	3,83
November	-	3,78	3,72	3,84
Dezember	-	3,75	3,69	3,80

Die Erhöhung der Wärmequellentemperatur in der Anlagenvariante „Kombination“ hat zur Folge, dass die Jahresarbeitszahl gegenüber der Anlagenvariante „Wolf“ gesteigert werden kann. Man kann erkennen, dass vor allem in den warmen Monaten die Anlagenvariante „Kombination“ einen Vorteil wegen der warmen Temperaturen im Niedertemperaturspeicher hat. Aber auch in den Wintermonaten ist eine geringe Steigerung der Arbeitszahl zu erkennen.

Die niedrigen Arbeitszahlen im August bei den Wärmepumpen im System „Wolf“ resultieren aus den relativ hohen Anfahrverlusten bei kurzen Laufzeiten der Wärmepumpe.

7.5 Auswertung solarthermische Energie an das System

Sonnenenergie ist die günstigste Energiequelle in unserem betrachteten System. Daher muss das primäre Ziel sein, mehr Sonnenenergie in das System aufzunehmen und den Energiebedarf von der Wärmepumpe zu reduzieren. Um das zu erreichen, soll die aufgrund der tiefen Temperaturen nicht direkt nutzbare solare Energie in einen Niedertemperaturspeicher eingespeist werden. Damit kann der solare Ertrag maximiert und gleichzeitig der Bedarf an Wärmepumpenwärme minimiert werden.

Da die Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ keine solare Unterstützung hat, wird sie in diesem Punkt nicht betrachtet. Die Anlagenvariante „Kombination“ unterscheidet sich durch einen weiteren Speicher, dem sogenannten Niedertemperaturspeicher“, der die nicht direkt nutzbare solare Wärme aufnimmt und der Wärmepumpe quellenseitig zur Verfügung stellt. Die jährliche Summe der Wärmemenge die von den Speichern aufgenommen wird, ist in Tabelle 7-8 sind aufgelistet.

Tabelle 7-8 jährlicher solarer Ertrag der Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“

jährlicher solarer Ertrag			
Beschreibung		Anlagenvariante	
		Wolf	Kombination
		Wert	Wert
Einheit			
solare Beladung Warmwasser	kWh/a	231,5	526,9
solare Beladung Heizung	kWh/a	5197,8	4982
solare Beladung Niedertemperaturspeicher	kWh/a	-	1019,6
gesamter jährlicher Solarertrag	kWh/a	5429,3	6528,5
spez. Kollektorertrag (12 m ² Absorberfläche)	kWh/a m ²	452,4	544,0

Die Verwendung eines Niedertemperaturspeichers erhöht in der Simulation den jährlichen solareren Ertrag um ca. 1100 kWh. Das bedeutet eine Steigerung um 20%. Der gesamte solare Ertrag im Pufferspeicher für Heizung und Warmwasser in der Anlagenvariante „Kombination“, ist annähernd gleich groß wie in der Vergleichssimulation „Wolf“. Die direkt nutzbare solare Energie wurde somit auch in der Anlagenvariante „Kombination“ im gleichen Umfang wie in der Variante „Wolf“ genutzt.

7.6 Energetische Betrachtung der Erdsonde

Bei der Auslegung der Erdsonde ist darauf zu achten, dass die Leistung der Wärmepumpe nicht die Leistung der Erdsonde übersteigt. Die Wärmeleistung, die pro Meter Erdbohrung zur Verfügung steht, ist abhängig von den geologischen Gegebenheiten am Standort. Bei einer korrekt ausgelegten Erdsonde ist zu jeder Jahreszeit genug Wärmeenergie im Bohrloch, um die Wärmepumpe zu versorgen. Wird eine gewisse Temperatur bzw. Druck am Eintritt des Verdampfers unterschritten, kann der Kältekreislauf nicht mehr betrieben werden. Die Wärme muss dann mit einem elektrischen Heizstab erzeugt werden, der nur mehr genau so viel Wärmemenge erzeugen kann wie elektrische Energie aufgenommen wird. Dieser Betriebszustand sollte wegen dem hohen Stromverbrauch vermieden werden. In der Tabelle 7-9 ist die jährliche Entzugsmenge aus der Erdwärmesonde angeführt. Zusätzlich ist für die Anlagenvariante „Kombination“ die jährliche Wärmemenge angegeben, die aus dem Niedertemperaturspeicher entnommen worden ist.

Tabelle 7-9 jährlich aufgenommenen Wärmemenge der Wärmepumpe

jährliche von der Wärmepumpe aufgenommene Wärmemenge				
Beschreibung		Anlagenvariante		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
		Wert	Wert	Wert
Erdwärmesonde	kWh/a	8364,70	5526,00	4496,80
Niedertemperaturspeicher	kWh/a	-	-	1037,30

Die Solaranlage bewirkt eine Reduktion der Wärmemenge die der Erdsonde entzogen werden muss um ca. 3000 kWh/a. Die Reduktion der Belastung zwischen den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“ entspricht der Solarenergie, die in den Niedertemperaturspeicher eingebracht wird. Die Reduktion der Erdsonden-Entzugsenergie kann aber in der Simulation nicht in eine Reduktion der Erdsondenlänge umgemünzt werden. Durch eine Reduktion der Länge resultiert eine geringere Entzugsleistung. Da der Wärmebedarf bei allen untersuchten Anlagen phasenweise nur von der Wärmepumpe gedeckt werden muss, muss auch die Leistung der Erdsonde für jede Anlage die gleiche sein.

7.7 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Simulation der drei Anlagen in einem Neubau-Einfamilienhaus mit Polysun 5.8, ergaben aufschlussreiche Erkenntnisse hinsichtlich der Bereitstellung ihres Endenergiebedarfs. Der Einsatz einer Solaranlage bringt eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs von 35% mit sich. Durch die Kombination der Wärmepumpe und der Solaranlage mit einem Niedertemperaturspeicher der als Schnittstelle fungiert, kann der Energieverbrauch wiederum um 3,5 % reduziert werden. Der theoretische Gesamtwärmebedarf ist mit 11500 kWh/a relativ gering und deutet auf ein relativ gut gedämmtes Haus hin. Zur Beschreibung der Effizienz des gesamten Heizsystems ist in der Tabelle 7-10 die Kennzahl „SPF des Systems“ eingeführt worden. Diese beschreibt das Verhältnis der verbrauchten Wärmemenge zur aufgenommenen elektrischen Energie des untersuchten Systems. Bei der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ ergibt ein SPF des Systems von 3,47. Dieser stellt das Verhältnis des Wärmebedarfs inkl. Speicherverluste zu der gesamten elektrischen Energieaufnahme des Systems dar. Wird als zusätzliche Wärmequelle eine Solaranlage verwendet, kann der SPF des Systems auf 6,07 gesteigert werden, wobei der SPF der Wärmepumpe nur von 3,63 auf 3,70 gesteigert werden kann. Eine weitere Verbesserung beider SPFs bringt die Anlagenvariante „Kombination“ mit sich.

Tabelle 7-10 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

	Einheit	System		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
Wärmebedarf inklusive Speicherverluste	kWh/a	11675	13463	13436
Kollektorertrag in BSP-SL-1000	kWh/a	-	5429	5509
Kollektorertrag gesamt	kWh/a	-	5429	6529
Wärmeverlust des Trinkwasser/Pufferspeicher	kWh/a	-399	-1765	-1799
Wärmeertrag der Wärmepumpe	kWh/a	11675	7678	7588
Entzugsenergie der Erdwärmesonde	kWh/a	8365	5526	4497
Elektrische Energieaufnahme der Wärmepumpe	kWh/a	3214	2078	1984
gesamte Elektrische Energieaufnahme	kWh/a	3368	2218	2141
Einsparung gegenüber System A	%	0	34	36
SPF der Wärmepumpe	-	3,63	3,70	3,82
SPF des Systems	-	3,47	6,07	6,28

Allgemein lässt sich aber kein signifikanter Vorteil der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe unter diesen Systemvoraussetzungen erkennen. Bei der Variation der System- und Regelparameter konnte festgestellt werden, dass das System „Kombination“ dann einen Vorteil bringt, je ungünstiger die Bedingungen für die Wärmepumpe und die Solaranlage sind. Das deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus dem Bericht von Herrn Haller im Kapitel 4.5.1. Unter realistischen Randbedingungen ist aber keine Effizienzverbesserung zu erkennen, die eine weitere Untersuchung der Anlage rechtfertigen würde. Aus diesem Grund ist auf eine Untersuchung der Anlage im Labor verzichtet worden.

8 Wirtschaftliche Analyse

Die Ergebnisse der Simulation aus dem vorigen Kapitel sind wenig erfolgversprechend, dass sich die Investition der Anlagenvariante „Kombination“ wirtschaftlich lohnt. Trotzdem soll auch dieser Aspekt beleuchtet werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten eine Investitionsrechnung durchzuführen. Um die Kosten einer Heizungsanlage über mehrere Jahre voraussagen zu können, muss eine dynamische Investitionsrechnung durchgeführt werden. In Gegensatz zu einer statischen können bei der dynamischen Investitionsrechnung, veränderbare Parameter berücksichtigt werden. Bei Heizungsanlagen ist die dynamische Komponente der Preis für die Endenergie.

8.1 Annuitätenmethode

In der Heizungstechnik bietet sich für den wirtschaftlichen Vergleich die Annuitätenmethode an. Mit dieser werden zum einen die jährlichen Kapitalkosten, die aufgrund einer Investition entstehen berechnet. Zum anderen können die jährlichen Heizkosten berechnet werden, die abhängig von der Preissteigerung auf die Nutzungsdauer aufgeteilt werden. Der jährliche Gesamtbetrag (Kapital + Heizkosten) zeigt die wirtschaftlich günstigste Variante für den Betrachtungszeitraum. Die jährlichen Gesamtkosten berechnen sich nach folgender Gleichung:

$$K = K_b + K_k \quad \text{Gleichung 8-1}$$

K	[€]	jährliche Gesamtkosten
K_b	[€]	jährliche Energiekosten/Betriebskosten
K_k	[€]	jährliche Kapitalkosten

8.1.1 Kapitalkosten

Die jährlichen Kapitalkosten leiten sich von den Investitionskosten, der Nutzungsdauer sowie dem Zinssatz einer Investition ab. Sie können nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$K_k = a * C \quad \text{Gleichung 8-2}$$

K_k	[€]	Jährliche Kapitalkosten
a	[-]	Annuitätenfaktor bzw. Kapitalwiedergewinnungsfaktor
C	[€]	Investitionskosten

a) Investitionskosten

Die Investitionskosten setzen sich aus den verbauten Komponenten, Rohrleitungen und Dämmung, Kosten für die Erdbohrung, sowie Montagekosten der Heizungsanlage zusammen. In der Tabelle 8-1 sind die Kostenposten für alle untersuchten Varianten aufgelistet

Tabelle 8-1 Kostenaufstellung der Investition

Investitionskosten						
Systemvariante	Wärmepumpe					
	Stand-Alone		Wolf		Kombination	
Wärmepumpe	€	6.475	€	6.475	€	6.475
Erdsonde Kosten pro m		€ 65		€ 65		€ 65
Erdsondenlänge [m]		130		130		130
Kosten Erdsonde	€	8.450	€	8.450	€	8.450
Kosten pro Solarkollektor		€ 805		€ 805		€ 805
Anzahl der Solarkollektoren [#]		0		6		6
Gesamtkosten Kollektoren	-		€	4.830	€	4.830
Trinkwasser-/ Pufferspeicher	€	1.850	€	4.525	€	4.525
Niedertemperaturspeicher	-		-		€	1.365
Solarpumpengruppe	-		€	730	€	730
Regelung	€	1.000	€	1.250	€	1.250
3-Wegeventil Sole-/Ladekreislauf		€ 134		€ 134		€ 134
3-Wegeventile WP [#]		2		2		3
3-Wegeventil Solarkreislauf		€ 190		€ 190		€ 190
3-Wegeventile Solar [#]		0		1		3
Kosten Wegeventile	€	268	€	458	€	972
Kosten für 20 l Solekonzentrat 1:4		€ 136		€ 136		€ 136
Füllmenge Sole [l]		120		120		600
Kosten für Solefüllung	€	204	€	204	€	1.020
Kosten für 60 kg Solarflüssigkeit			€	378	€	378
Rohrleitungen & Montage	€	2.600	€	3.040	€	3.300
Summe	€	20.847	€	30.340	€	33.295

Die Vertriebspreise wurden der Preisliste für Heizsysteme der Firma Wolf aus dem Jahr 2011 entnommen und verstehen sich mit 19% Mehrwertsteuer abzüglich eines üblichen Preisrabatts für Privatkunden von ca. 20%. Die Kosten für die Bohrung und Installation der Erdsonde sind abhängig von den geologischen Eigenschaften sowie der Länge der notwendigen Bohrung. Die Kosten für die Erdbohrung sind mit einem pauschalen Preis von 65 €/m angesetzt worden. Der Bedarf einer Solarregelung bringt 250 € Zusatzkosten im Vergleich zu der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“. Die signifikant hohen Kosten für die Solefüllung in der Anlagenvariante „Kombination“ werden durch die Füllung des Niedertemperaturspeichers verursacht. Die Füllmengen des Solarkreislauf und des Solekreislauf berechnen sich aus dem Volumen der Rohrleitungen die für jeden Kreislauf mit

25 m angenommen wurden, sowie der Füllmenge der Ausdehnungsgefäße. Beim Solarkreislauf wurde die Füllmenge der Kollektoren, beim Solekreislauf die Füllmenge der Erdsonde mitberücksichtigt. Die Kosten für Rohrleitung inkl. Montage wurden auf Grundlage der Erfahrung von werksinternen Heizungsbauern bestimmt.

Es konnten keine staatlichen Programme in Deutschland gefunden werden, die eine Investition einer Wärmepumpe oder Solaranlage bei Neubau eines Wohngebäudes finanziell fördern. Es gibt lediglich für Sanierungen eines Bestandsbau Förderungen in der Höhe von 90 €/m² Kollektorfläche, sowie einen Zuschuss von 2400€ für eine Wärmepumpe bis 10 kW. In diesem Fall hätte man auch noch Anspruch auf einen Kombinationsbonus von 500 €, da eine Solaranlage und eine Wärmepumpenanlage verbaut werden.

b) Nutzungsdauer und Zinssatz

Die Anlagen wurden für einen Neubau mit sehr hohem Dämmungsstandard nach EnEV 2007 simuliert. Für Neubauten die dieser Effizienzklasse gibt es von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) ein Förderprogramm mit der Programmnummer 153 (Energieeffizient Bauen). Für ein Bauvorhaben das diesen Anforderungen genügt, erhält man von der KfW einen Kredit mit einem festgeschriebenen effektivem Zinssatz von 2,25 %, bei einer Laufzeit von 20 Jahren (Kreditanstalt für Wiederaufbau, 2012).

Für die Nutzungsdauer von Heizungsanlagen werden üblicherweise 20 Jahre angenommen.

c) Annuitätenfaktor

Mit Hilfe des Annuitätenfaktors können die Investitionskosten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer sowie des Zinssatzes, auf gleichmäßige jährliche Kapitalkosten während der Nutzungszeitraums aufgeteilt werden. Der Annuitätenfaktor berechnet sich folgendermaßen:

$$a = \frac{(i + 1)^n * i}{(i + 1)^n - 1}$$

Gleichung 8-3

a	[-]	Annuitätenfaktor bzw. Kapitalwiedergewinnungsfaktor
i	[%]	Zinssatz des Kredits
n	[a]	Nutzungsdauer

8.1.2 Energiekosten

Die Energiekosten berechnen sich aus dem Endenergieverbrauch, dem Endenergiepreis im ersten Jahr der Nutzung, und einem preisdynamischen Annuitätenfaktor. Die jährlichen Energiekosten lassen sich nach folgender Formel berechnen:

$$K_b = \beta * W_{EE} * e_{EE}$$

Gleichung 8-4

K_b	[€]	jährliche Energiekosten/Betriebskosten
β	[-]	preisdynamischer Annuitätenfaktor
W_{EE}	[kWh]	Endenergieverbrauch
e_{EE}	[€/kWh]	Endenergiepreis im ersten Jahr

a) Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch ergibt sich aus den Simulationsergebnissen die im Kapitel 7 zu finden sind. Da für den Wärmepumpenstrom ein eigener Tarif angeboten wird sind die Energieverbräuche der Wärmepumpe und der hydraulischen Pumpe separiert.

b) Strompreis

Die Energieversorger bieten einen eigenen Tarif für Wärmepumpenstrom an. Dieser ist günstiger als der normale Stromtarif, wobei die Stromversorgung von den EVUs zu gewissen Zeiten abgeschaltet werden darf. Der Preis für den Wärmepumpenstrom ist der Homepage des Energieanbieters EON entnommen worden. Zur Zugriffszeit wurden der Hochtarifpreis mit 18,05 Cent/kWh und der Niedertarif mit 14,83 Cent/kWh angegeben. Der Hochtarifpreis wird in den Zeiten mit hohem Stromverbrauch der Verbraucher angesetzt. Um die Investitionsrechnung zu vereinfachen wurde ein durchschnittlicher Preis von 17 Cent/kWh im ersten Jahr angenommen. Der Strompreis für den Normaltarif war zur Zugriffszeit mit 23,01 Cent/kWh angegeben (E.ON Bayern, 2012).

c) Preisdynamischer Annuitätenfaktor

Die Berechnung des preisdynamischen Annuitätenfaktors erfolgt unter Berücksichtigung der zu erwartenden Bezugspreissteigerung der Endenergie. Um diese abzuschätzen, ist die durchschnittliche Preissteigerung der letzten 10 Jahre für den Betrachtungszeitraum angenommen worden, welche in Deutschland auf Grundlage einer Statistik des Bundesverbands für Energie und Wasserwirtschaft 5,7 % beträgt (BDEW, 2011). Der preisdynamische Annuitätenfaktor errechnet sich wie folgt:

$$\beta = a * \frac{q^n - (1 + p)^n}{q^n [q - 1 + p]}$$

Gleichung 8-5

$$q = (i + 1)$$

Gleichung 8-6

β	[€/kWh]	preisdynamischer Annuitätenfaktor
a	[-]	Annuitätenfaktor bzw. Kapitalwiedergewinnungsfaktor
p	[%/a]	Steigerung des Endenergiepreis
n	[a]	Nutzungsdauer
i	[%]	Zinssatz des Kredits

8.2 Jährliche Kosten der Anlagenvarianten

Auf Grundlage der Berechnung mit Hilfe der Annuitätenmethode teilen sich die jährlichen Kosten nach Tabelle 8-2 auf.

Tabelle 8-2 Vergleich der jährlichen Kosten von den untersuchten Anlagenvarianten

	Einheit	Anlagenvariante		
		"Wärmepumpe Stand-Alone"	Wolf	Kombination
Zinssatz (KfW Darlehen Programm 153)	%	2,25%	2,25%	2,25%
Nutzungsdauer	a	20	20	20
Preisteigerung Strom (Durchschnitt der letzten 10 Jahre)	% p.a.	5,7%	5,7%	5,7%
Investitionskosten für Heizungsanlage	€	20847	30340	33295
Annuitätsfaktor	% p.a.	6,26%	6,26%	6,26%
Kapitalkosten	€/a	1306	1901	2086
Endenergieverbrauch Wärmepumpe	kWh/a	3214	2078	1984
Endenergiepreis im 1. Jahr (Wärmepumpenstrom)	€/kWh	0,17	0,17	0,17
Endenergieverbrauch Pumpen	kWh/a	154	140	157
Endenergiepreis im 1. Jahr (allgemeiner Strompreis)	€/kWh	0,23	0,23	0,23
Preisdynamischer Annuitätenfaktor	-	1,72	1,72	1,72
Energiekosten	€/a	999	662	641
Energie + Kapital	€/a	2305	2563	2727

Die Ergebnisse der Berechnung zeigen, dass die Investition einer Solaranlage über einen Nutzungszeitraum von 20 Jahren einen finanziellen Nachteil gegenüber der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ bietet. Erst ab einem hypothetischen Nutzungszeitraum von 35 Jahren sinken die jährlichen Kosten der Anlagenvariante „Wolf“ unter jene der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“. Da eine längere Nutzungsdauer durch eine geringere Wärmepumpenlaufzeit in der Anlagenvariante „Kombination“ zu erwarten ist (siehe Kapitel 0), wird sich im realen Einsatz ein besseres Abschneiden dieser Anlagenvariante zeigen. Eine gravierende Verbesserung im Vergleich ist aber nicht zu erwarten. Erst bei einer angenommenen jährlichen Preissteigerung des Endenergiepreises von 11 % ist die Anlagenvariante „Wolf“ vorteilhafter gegenüber der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“.

Aus der Berechnung kann aber geschlossen werden, dass wegen des kaum geringeren Energieverbrauchs der Anlagenvariante „Kombination“, und durch die hohen Investitionskosten, jährliche Mehrkosten von ca. 170€ gegenüber der Anlagenvariante „Wolf“ auftreten. Auch bei der Variation der Nutzungsdauer oder der jährlichen Preissteigerung in einem realistischen Rahmen kann die Anlagenvariante „Kombination“ nicht unter die jährlichen Kosten der Referenzvariante „Wolf“ sinken. Es muss daher von der Realisierung der Anlagenvariante „Kombination“ aus wirtschaftlicher Sichtweise, klar abgeraten werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist auf Grundlage einer Marktstudie ein Konzept untersucht worden, mit dem ein kombinierter Betrieb einer Solaranlage und Wärmepumpe mit konstruktiv unveränderten Komponenten möglich ist. Dabei sind keine Umbaumaßnahmen oder Weiterentwicklungen dieser Komponenten notwendig. Lediglich die hydraulische Schaltung sowie die Regelung sind zu erweitern. Es konnte festgestellt werden, dass vor allem die Regelung das System sehr komplex macht.

9.1 Vorteile der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe

Sowohl aus Sicht der Wärmepumpe wie auch aus Sicht der solarthermischen Anlage, lassen die wissenschaftlichen Grundkenntnisse eine Verbesserung der Effizienz zu erwarten. Aus Solarthermischer Sicht verspricht man sich folgende Vorteile:

- Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades wegen geringerer Temperaturdifferenzen zwischen Absorber und Außenlufttemperatur im kombinierten Betrieb
- Vermeidung von Stagnation mit Hilfe von aktiver Regeneration des Erdreichs
- Erhöhung des solaren Kollektorertrages wegen längerer Laufzeiten der Solaranlage

Von Seiten der Wärmepumpe können folgende Vorteile in Aussicht gestellt werden:

- Verbesserung des COPs bzw. der Arbeitszahl durch höhere Wärmequellentemperatur
- Verringerung der Wärmepumpenlaufzeit und damit eine Erhöhung der Lebensdauer der Wärmepumpe
- Verzicht auf großflächige Erdwärmetauscher
- Aktive bzw. Passive Regeneration des Erdreichs

Allerdings sind auch negative Auswirkungen zu erwarten bzw. Vorkehrungen zu treffen, um einen kombinierten Betrieb zu ermöglichen. Allen voran ist das Problem der Kondenswasserbildung im Kollektor, wenn die mittlere Absorbtemperatur unter die Außenlufttemperatur sinkt, zu nennen. Hier sind Vorkehrungen zu treffen, damit entweder dieser Betriebspunkt regelungstechnisch nicht eintreten, bzw. das Wasser abfließen kann, ohne die Dämmung zu beschädigen.

Der regelungstechnische und hydraulische Mehraufwand ist ein weiterer Nachteil den, die Kombination von Wärmepumpe und Solarthermie mit sich bringt, und stellt auch die Heizungsmonteur vor neuen Aufgabenstellungen.

9.2 Marktanalyse

Die Marktanalyse hat gezeigt, dass schon einige Hersteller Systeme am Markt anbieten, die eine Effizienzsteigerung durch die Kombination von Solarthermie und Kombination versprechen. Dabei gibt es fast genau so viel Kombinationsvariationen wie Hersteller, was darauf deutet, dass ein optimales System noch nicht gefunden wurde. Die im Kapitel 0 gezeigte Klassifizierung ist ein Versuch, die Systeme durch ihren grundsätzlichen Systemaufbau einzuteilen. Tatsächlich lässt die Vielzahl der Varianten wegen der sehr individuellen Gestaltungsmöglichkeiten aber kaum eine Einteilung zu

9.3 Anlagenvarianten und Ergebnisse der Simulation

Es sind drei Heizanlagenvarianten definiert worden, die unter den gleichen Rahmenbedingungen einen Neubau mit 150 m² Wohnfläche und einem jährlichen Energiebedarf von 50 kWh/m² beheizen und 200 l/d Warmwasser zur Verfügung stellen müssen. Die Simulation wurde mit Polysun 5.8 in der Designer Version durchgeführt. Da die Auswertungen von Polysun nicht ausreichten wurden die Berechnungsergebnisse in MS Excel übernommen und weiter ausgewertet.

Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“

Diese Anlage muss das Gebäude sowie den Warmwasserbedarf vollständig mit einer Wärmepumpe decken. Bei einem Gesamtenergieverbrauch von 11675 kWh/a verbraucht das System rund 1150 kWh/a mehr Strom als die Anlagenvariante „Wolf“. Damit ist der Stromverbrauch um ca. 35 % höher als bei den anderen untersuchten Anlagenvarianten. Die wirtschaftliche Untersuchung ergab allerdings, dass bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren und bei einer Strompreissteigerung von 5,7 % wegen der im Vergleich geringen Investitionskosten der Betrieb günstiger gegenüber den beiden anderen Anlagenvarianten ist.

Anlagenvariante „Wolf“

Die Anlagenvariante „Wolf“ repräsentiert ein System wie es üblicherweise bei gleichzeitiger Installation einer Wärmepumpe und einer solarthermischen Anlage in einer Heizanlage zum Einsatz kommt. Es ist aber keine Interaktion der beiden Systeme vorgesehen. Die Wärmepumpe muss den Wärmebedarf decken der nicht von der Solaranlage gedeckt werden kann.

Der Stromverbrauch der gesamten Heizanlage ist mit ca. 2200 kWh/a im Vergleich zur Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ relativ gering, was vor allem daran liegt, dass ein beachtlicher Teil des Wärmebedarfs solar gedeckt wird. Dadurch wird erheblich weniger, meist durch fossile Rohstoffe erzeugte, Nutzenergie verbraucht. Bei einer Durchschnittlichen CO₂ Emission von 523 g/kWh (Deutschland im Jahr 2004) (Bundesverband für Energie und Wasserwirtschaft, 2012) werden dadurch 600 kg CO₂/a weniger erzeugt. Daher hat dieses System auch aus ökologischer Sicht seine volle Berechtigung.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist aber trotz des enormen Einsparungspotentials davon abzuraten, eine Solaranlage zu installieren. Unter den Voraussetzungen ein energieeffizientes Gebäude bauen zu wollen, kann man einen sehr günstigen Kredit erhalten, aber es gibt keine weiteren Förderungen für eine Solaranlage oder Wärmepumpe. Die wesentlich höheren Investitionskosten verursachen jährliche Kosten, die jene der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“ übersteigen.

Anlagenvariante „Kombination“

Bei der Anlagenvariante „Kombination“ wird eine Interaktion der Wärmepumpe mit der Solaranlage über einen Niedertemperaturspeicher ermöglicht. Dieser wird mit solarer Wärme beladen, wenn die Einstrahlung am Kollektor noch nicht ausreicht, um im Pufferspeicher direkt Warm- oder Heizwasser zu erzeugen. Übersteigt die Temperatur der Sole im Niedertemperaturspeicher die Temperatur am Austritt der Erdsonde, wird der Niedertemperaturspeicher als Wärmequelle der Wärmepumpe verwendet. Dadurch wird die Quelltemperatur erhöht, was eine Steigerung der Arbeitszahl und damit eine geringere Stromaufnahme der Wärmepumpe zur Folge hat.

Der Stromverbrauch des Heizsystems ist mit rund 2100 kWh/a um 3,5 % geringer als der Stromverbrauch der Referenzanlage „Wolf“. Der zusätzliche solare Ertrag von 1100 kWh/a ist zu gering, um eine wesentlich bessere Effizienz zu erreichen. Die Steigerung des SPF (Seasonal Performance Factor) beträgt lediglich 3,2 %. Es konnte auch kein Einsparungspotential bei der Länge der Erdsonde festgestellt werden. Auch wenn die jährliche Entzugsenergie reduziert werden konnte, ist der Leistungsbedarf der Wärmepumpe in den Wintermonaten bei allen Varianten der gleiche.

Der Versuch die solare Wärme in den Niedertemperaturspeicher einzubringen, wenn der Pufferspeicher mit Warm- und Heizwasser bereits beladen ist, brachte keine Verbesserung der Wärmepumpeneffizienz mit sich.

Wirtschaftlich gesehen ist die Variante „Kombination“ die teuerste Lösung sein Haus zu beheizen. Die verhältnismäßig sehr hohen Investitionskosten und die zu geringe Stromeinsparung, sind die Ursachen für die höchsten jährlichen Kosten unter den verglichenen Anlagenvarianten.

9.4 Ausblick

Mehrere Simulationen mit variierenden Parametern haben gezeigt, dass eine Kombination umso vorteilhafter wird, je ungünstiger die Bedingungen für die Solaranlage und Wärmepumpe werden. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den Resultaten aus dem Forschungsbericht von Herrn Haller (siehe Kapitel 4.5.1). Die Bedingungen für Luftwärmepumpen sind generell schlechter als jene für Sole/Wasser-Wärmepumpen. Vor allem im Winter führen die tiefen Lufttemperaturen zu schlechten Arbeitszahlen. Hier wäre ein mögliches Einsatzgebiet für eine Kombination mit einer Solaranlage gegeben. Um eine solche zu realisieren wäre ein Hybridverdampfer notwendig, um das Kältemittel im Wärmepumpenkreislauf mit Ansaugluft und Solarflüssigkeit erwärmen zu können, bzw. eine Sole/Wasser Wärmepumpe deren Solekreislauf mit Luft oder Sonnenenergie erwärmt wird (KIOTO siehe Anlage 1). Die Einbindung der Solarwärme in den Solekreislauf könnte sowohl direkt oder über einen Niedertemperaturspeicher wie auch in der Anlagenvariante „Kombination“ erfolgen.

Literaturverzeichnis

- Alpha Innotec. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 7. Oktober 2011.] <http://www.alpha-innotec.de/>.
- Aquasol. 2011.** Aquasol Solartechnik GmbH. [Online] 2011. [Zitat vom: 12. September 2011.] www.aquasol-solartechnik.de.
- BDEW. 2011.** Bundesverband der Energie und Wassereirtschaft. [Online] 2011. [Zitat vom: 2011. November 21.]
- Buderus Heiztechnik GmbH. 34. Auflage 2002.** *Handbuch für Heizungstechnik*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 34. Auflage 2002. ISBN 3-410-15283-0.
- Buderus. 2010.** *Planungsunterlage Solartechnik Logasol*. Wetzlar : Buderus GmbH, 2010.
- Bundesministerium für Wirtschaft. 1993.** Bonn : s.n., 1993.
- Bundesverband für Energie und Wasserwirtschaft. 2012.** [Online] 2012. [Zitat vom: 11. März 2012.] <http://www.bdew.de>.
- Bundesverband Wärmepumpe. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 20. Oktober 2011.] www.waermepumpe.de.
- Chemowerk GmbH. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 4. Oktober 2011.] www.chemo.de.
- Consolar. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 25. September 2011.] <http://www.consolar.de/>.
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. 2008.** *Solarthermische Anlagen*. Berlin : Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008.
- Deutscher Wetterdienst.** [Online] [Zitat vom: 6. November 2011.] www.dwd.de.
- Drück, Harald. 2010.** *Solarthermie und Wärmepumpe*. Stuttgart : s.n., 2010.
- E.ON Bayern. 2012.** [Online] Jänner 2012. [Zitat vom: 10. Jänner 2012.] www.eon-bayern.com.
- Haller, Michel Y und Frank, Elimar. 2011.** Steigert die Nutzung von Solarkollektoren die Systemarbeitszahl. *21. Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein : Otti e.V., 2011, S. 559-563.
- Haller, Michel Y., Frank, Elimar und Trinkl, Christoph. 2010.** systematische Gliederung der Systemkombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen. *20. Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein : Otti, 2010.
- Henning, Hans Martin und Miara, Marek. 2009.** Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe. *19. Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein : Otti e.V., 2009.
- IDM. 2011.** Wärmepumpen von IDM Energiesystemen. [Online] 2011. [Zitat vom: 20. September 2011.] www.idm-energie.at.
- Immosolar. 2011.** Immosolar Energymanagement. [Online] 2011. [Zitat vom: 21. September 2011.] www.immosolar.com.
- Kioto. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 4. Oktober 2011.] <http://www.kioto.com/>.
- Kreditanstalt für Wiederaufbau. 2012.** KfW Bankengruppe. [Online] 2012. [Zitat vom: 10. Jänner 2012.] www.kfw.de.
- Mette, Barbara. 2010.** Richtige Kombination. *etageen*. 2010, 0510.
- Miara, Marek. 2010.** *Solarthermie und Wärmepumpen Vorstellung verschiedener Anlagenkonzepte*. Stuttgart : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2010.

- Müller, Holger, Trinkl, Christoph und Zörner, Wilfried. 2008.** *Niederst- und Niedertemperaturkollektoren*. Ingolstadt : Kompetenzzentrum Solartechnik Ingolstadt, 2008.
- Neukomm, Rosmarie, Oesch, Peter und Leibfried, Ulrich. 2010.** Solarheizung SOLAERA vom Hersteller Consolar ermöglicht die komplette Hauswärmeversorgung mit nur einem System. 16. Status Seminar "Forschen und Bauen im Kontext mit Energie und Umwelt. Zürich : brenet, 2010.
- Polysun 5.8. 2012.** Polysun.de. [Online] Vela Solaris, 2012. [Zitat vom: 2011. Dezember 13.] www.polysun.de/FAQ.
- Quaschnig, Volker. 6. Auflage 2009.** *Regenerative Energiesysteme*. München : Hanser Verlag, 6. Auflage 2009. ISBN 978-3-446-42151-6.
- Ratiotherm. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 24. September 2011.] <http://www.ratiotherm.de/>.
- Rieberer, Rene. 2010.** Heizung, Lüftung Klimatechnik Skriptum. Graz : Institut für Wärmetechnik Technische Universität Graz, 2010.
- Rieger, Ingo und Hube, Werner. 2010.** Erfolgsverprechendes Doppel. *TGA Fachplaner*. 2010, 03-2010.
- Riegger, Mathieu. 2010.** Saisonale Solarwärmespeicher im Untergrund. s.l. : Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, 2010.
- Roth Werke. 2011.** Roth Werke - Solargeo. [Online] 2011. [Zitat vom: 6. Oktober 2011.] www.roth-werke.de.
- Schüco. 2011.** Schüco. [Online] 2011. [Zitat vom: 3. Oktober 2011.] www.schueco.de.
- Soltex. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 28. September 2011.] www.soltex-net.de.
- SOLution. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 23. September 2011.] <http://www.sol-ution.com/>.
- Solvis. 2011.** Solvis-SolvisMax. [Online] 2011. [Zitat vom: 5. Oktober 2011.]
- Sonnenkraft. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 3. Oktober 2011.] <http://www.sonnenkraft.at/>.
- Streicher, Wolfgang. 2008.** *Sonnenenergienutzung*. Graz : Institut für Wärmetechnik, 2008.
- TGA Fachplaner. 2010.** Solarthermie optimiert Wärmepumpe. *TGA Fachplaner*. 2010, Bd. 11.
- Thermosolar AG. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 5. Oktober 2011.] <http://www.thermosolar.com/>.
- Transsolar Software V.17. 2012.** Transsolar Softwareengineering. [Online] Transsolar, 2012. [Zitat vom: 20. September 2011.]
- Trinkl, Cristoph und Zörner, Wilfried. 2005.** Solares Heizen mit Wärmepumpe - Ein Überblick über die Heizsysteme der letzten 30 Jahre. 15. *Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein : Otti, 2005.
- Umweltbundesamt Deutschland. Umweltbundesamt Deutschland.** [Online] [Zitat vom: 7. Oktober 2011.] www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de.
- VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung. 2011.** Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. s.l. : Beuth Verlag, 2011.
- Vela Solaris AG. 2012.** *Polysun 5.8*. [Software] Wintherthur : Vela Solaris, 2012.
- Vela Solaris. 2012.** *Benutzerdokumentation Polysun 5.8*. Wintherthur : Polysun, 2012.
- Viessmann GmbH. 2008.** *Planungshandbuch Solarthermie*. Allendorf : Viessmann Werke Deutschland, 2008.

Wolf GmbH. *Fachbericht.* 707.

Wolf GmbH. 2011. *Planungsunterlagen Hocheffizienz Wärmepumpen.* Mainburg : Wolf GmbH, 2011.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Wetter-Server Österreich. [Online] [Zitat vom: 15. Oktober 2011.]

Zienterra, Gregor. 2008. Solarthermie und Erdwärme intelligent kombiniert. *Fachverlag Schiele & Schön GmbH.* 2008, Bd. 11, November 2008.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Einsatz erneuerbarer Energien (Bundesministerium für Wirtschaft, 1993)	2
Abbildung 1-2 Entwicklung des Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern (Umweltbundesamt Deutschland).....	3
Abbildung 1-3 Strahlungsangebot auf der Erde [(Viessmann GmbH, 2008)]	4
Abbildung 1-4 Globalstrahlung und ihre Komponenten bei unterschiedlichen Himmelszuständen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	5
Abbildung 1-5 Globalstrahlungskarten für Deutschland (links) (Deutscher Wetterdienst) und Österreich (rechts) (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).....	6
Abbildung 2-1 Standardsolaranlage mit Heizkessel zur Nachheizung (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).....	7
Abbildung 2-2 Verschiedene Systemgrenzen zur Berechnung des solaren Deckungsgrades (Streicher, 2008).....	10
Abbildung 2-3 Solarer Deckungsgrad und Systemnutzungsgrad (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	11
Abbildung 2-4 Energieangebot einer Sonnenkollektoranlage (b) im Verhältnis zum jährlichen Energiebedarf für Warmwasserbereitung (a) (links) Energieangebot einer Sonnenkollektoranlage (b) im Verhältnis zum jährlichen Energiebedarf für Warmwasserbereitung und Heizung (a) (rechts) (Buderus, 2010)	12
Abbildung 2-5 Energiebilanz am Kollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	13
Abbildung 2-6 Kollektorkennfeld für verschiedene Kollektortypen (Streicher, 2008)	15
Abbildung 2-7 Verschiedene Bauformen von Solarthermiekollektoren (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).....	16
Abbildung 2-8 Querschnitte verschiedener Kunststoffabsorber (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	17
Abbildung 2-9 Verschiedene Absorberoberflächen und deren strahlungsspezifischen Kennzahlen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).....	18
Abbildung 2-10 Bauformen von Absorbern in einem Flachkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).....	19
Abbildung 2-11 Direkt durchströmter Röhrenkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	20
Abbildung 2-12 Heatpipe Röhrenkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	20
Abbildung 2-13 Vakuumflachkollektor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008)	21

Abbildung 2-14 Niedertemperatur Kollektortypen (Müller, et al., 2008)	22
Abbildung 3-1 Realisierung eines Kältekreislaufes (Rieberer, 2010).....	23
Abbildung 3-2 Kältekreislauf einer Wärmepumpe zur Versorgung eines Haushalts (Wolf Gmbh, 2011)	25
Abbildung 3-3 Luftwärmepumpe mit nach außen führenden An- und Absaugkanal (Bundesverband Wärmepumpe, 2011).....	28
Abbildung 3-4 Temperaturverlauf der Erdschicht an verschiedenen Zeiten im Jahr (Wolf Gmbh, 2011)	29
Abbildung 3-5 Wärmepumpe mit Erdsonde (Bundesverband Wärmepumpe, 2011)	30
Abbildung 3-6 Verlauf der minimalen Temperatur im Erdreich über mehrere Jahre (Bundesverband Wärmepumpe, 2011).....	32
Abbildung 3-7 Wärmepumpe mit zwei parallelen Erdkollektorkreisen (Bundesverband Wärmepumpe, 2011).....	33
Abbildung 3-8 Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle (Bundesverband Wärmepumpe, 2011).....	34
Abbildung 4-1 Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades durch Reduktion der Temperaturdifferenz zwischen mittleren Kollektor- und Außenlufttemperatur; rot: Normalbetrieb, blau: Betrieb im Niedertemperaturbereich	36
Abbildung 4-2 Abhängigkeit des COP einer Wärmepumpe von der Quelltemperatur (Soletemperatur) bei verschiedenen Vorlauftemperaturen.....	38
Abbildung 4-3 Systemkonfiguration eines parallelen Solar-Wärmepumpensystems (Müller, et al., 2008)	41
Abbildung 4-4 Wärmepumpe und Solaranlage arbeiten unabhängig voneinander (Miara, 2010) Hersteller: Viessmann, Vaillant, Nibe, Bosch Thermotechnik	42
Abbildung 4-5 Kombination mit WP als Backup (Miara, 2010) Hersteller: Solvis	42
Abbildung 4-6 mögliche Systemkonfigurationen für serielle Solar-Wärmepumpensysteme (Müller, et al., 2008)	43
Abbildung 4-7 Solarwärme wird indirekt über eine Wärmepumpe in das System eingebracht (Miara, 2010) Hersteller: Rheinzink (Unverglaste Solarkollektoren zur Erhöhung der Vorlauftemperatur), MEFA Energy Systems (Kömmelt Peter/Solarthermie Wärmepumpe) ..	44
Abbildung 4-8 mögliche Systemkonfiguration für parallele Solar-Wärmepumpensysteme (Müller, et al., 2008)	45
Abbildung 4-9 Kombiniertes System mit der Möglichkeit zur aktiven Regeneration des Erdreichs (Miara, 2010) Hersteller: IDM, Immosolar, Schüco, Roth.....	45
Abbildung 4-10 solarbeladener Pufferspeicher dient als Wärmequelle für Wärmepumpe (Miara, 2010) Hersteller: Chemowerk- CEMO, Soltex, Thermosolar	46

Abbildung 4-11 Luftwärmepumpe mit solarer Vorwärmung (Miara, 2010) Hersteller: Solution, ratiotherm, alpha-innotec, Sonnenkraft	47
Abbildung 4-12 Latentspeicher als Wärmepumpenquelle (Miara, 2010) Hersteller: Consolar, WESTFA, Aquasol, Terra Sunenergy	48
Abbildung 4-13 Betriebsvarianten von Solar-Wärmepumpensystemen, links direkte, rechts indirekte (d.h. über Wärmepumpe) Einbringung der Kollektorwärme in das System (Haller, et al., 2011)	49
Abbildung 4-14 Grenzlinien für eine vorteilhafte indirekte Nutzung der Kollektorwärme für verschiedene $COP_{hp, ind}$ (Haller, et al., 2011)	51
Abbildung 4-15 Werte für die Einstrahlung unter derer sich die indirekte Nutzung von Kollektorwärme für das untersuchte System positiv auswirkt. (Haller, et al., 2011)	52
Abbildung 4-16 Systemschaubild (Mette, 2010)	53
Abbildung 4-17 Systemschaltbild der Schüco-Anlage (TGA Fachplaner, 2010)	55
Abbildung 4-18 Temperaturverlauf des Erdreichs über die ersten drei Jahre (TGA Fachplaner, 2010)	56
Abbildung 4-19 von Buderus untersuchte Solar-Wärmepumpensysteme (Rieger, et al., 2010)	57
Abbildung 4-20 Anlagenschaubild von SOLEARA der Fa. Consolar (Neukomm, et al., 2010)	62
Abbildung 4-21 Wärmemengenverteilung der Wärmeerzeuger einer SOLAERA Feldtestanlage in einem Untersuchungsjahr. (Neukomm, et al., 2010)	64
Abbildung 5-1 Definition der Schichthöhen im Polysun-Speicher (Vela Solaris, 2012)	69
Abbildung 5-2 Schichtenspeicher BSP-W-SL mit zwei Wendelwärmetauschern für die solare Beladung	70
Abbildung 5-3 Höhen der Speicherfühler sowie der Schichttrennplatten im Pufferspeicher BSP-W-SL-1000	71
Abbildung 5-4 Niedertemperaturspeicher SPU-2-W	72
Abbildung 5-5 Aufbau des Wärmepumpenspeicher SEW-1	74
Abbildung 5-6 Modellreihe BWS (Wolf GmbH, 2011)	75
Abbildung 5-7 Aufbau des Solarkollektors TopSon F3-1 (Wolf GmbH, 2011)	77
Abbildung 6-1 Wizard Maske bei der Erstellung eines neuen Projekts in Polysun (Vela Solaris AG, 2012)	81
Abbildung 6-2 Schema Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“	85
Abbildung 6-3 Hydraulikschema Anlagenvariante „Wolf“	87
Abbildung 6-4 Hydraulikschema Anlagenvariante	88

Abbildung 6-5 Vorlage 25e von Polysun (Vela Solaris AG, 2012)	90
Abbildung 7-1 Energieflüsse Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“	97
Abbildung 7-2 Energieflüsse der Anlagenvariante „Wolf“	98
Abbildung 7-3 Energieflüsse über kombinierte Variante	99
Abbildung 7-4 Energieströme über Pufferspeicher BSP-W-SL-1000 in den Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 spezifische Entzugsleistung und Sondenlänge	31
Tabelle 3-2 Erlaubte spezifische Entzugsleistung bei verschiedenem Untergrund (1800 h/2400 h ohne/mit Warmwasserbedarf) (VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, 2011).....	33
Tabelle 4-1 Simulationsergebnisse der drei untersuchten Anlagenvarianten (Mette, 2010) ..	54
Tabelle 4-2 Ausgewählte Energiewerte für zwei beispielhafte Tage im April (Rieger, et al., 2010).....	58
Tabelle 4-3 Ausgewählte Energiewerte für ein komplett simuliertes Jahr (Rieger, et al., 2010)	59
Tabelle 4-4 Simulationsergebnisse einer Luft-Wärmepumpe (Miara, 2010).....	61
Tabelle 4-5 Simulationsergebnisse der SOLAERA an zwei Standorten . (Neukomm, et al., 2010).....	63
Tabelle 5-1 Technische Daten BSP-W-SL-1000.....	71
Tabelle 5-2 Modellvarianten des SPU Pufferspeichers.....	72
Tabelle 5-3 Technische Daten des SPU-2-W-500	73
Tabelle 5-4 Technische Daten SEW-1-300.....	74
Tabelle 5-5 Technische Daten BWS-1 (Wolf GmbH, 2011).....	76
Tabelle 5-6 Technische Daten TopSon F3-1 (Wolf GmbH, 2011)	77
Tabelle 5-7 Kennwerte der Erdsonde	78
Tabelle 5-8 Übersicht der verwendeten Pumpen.....	79
Tabelle 6-1 Daten des Standorts	82
Tabelle 6-2 Gebäudeeigenschaften.....	82
Tabelle 6-3 Warmwasserprofil.....	83
Tabelle 6-4 Hysterese-Schaltung der Solarpumpe	91
Tabelle 6-5 Regelverhalten der Solarkreispumpe.....	93
Tabelle 6-6 Regelverhalten des Wegeventils im Solarkreislauf.....	94
Tabelle 6-7 Vergleich des Verbrauchs von elektrischer Energie bei der Anlagenvariante „Kombination“ unter den zwei untersuchten Betriebsmodi.	95
Tabelle 7-1 Jahreswerte der System-Energiebilanz.....	99
Tabelle 7-2 Jährlicher elektrischer Energieverbrauch	101
Tabelle 7-3 Jahresenergiebilanz des Trinkwasserspeichers in der Anlagenvariante „Wärmepumpe Stand-Alone“	103

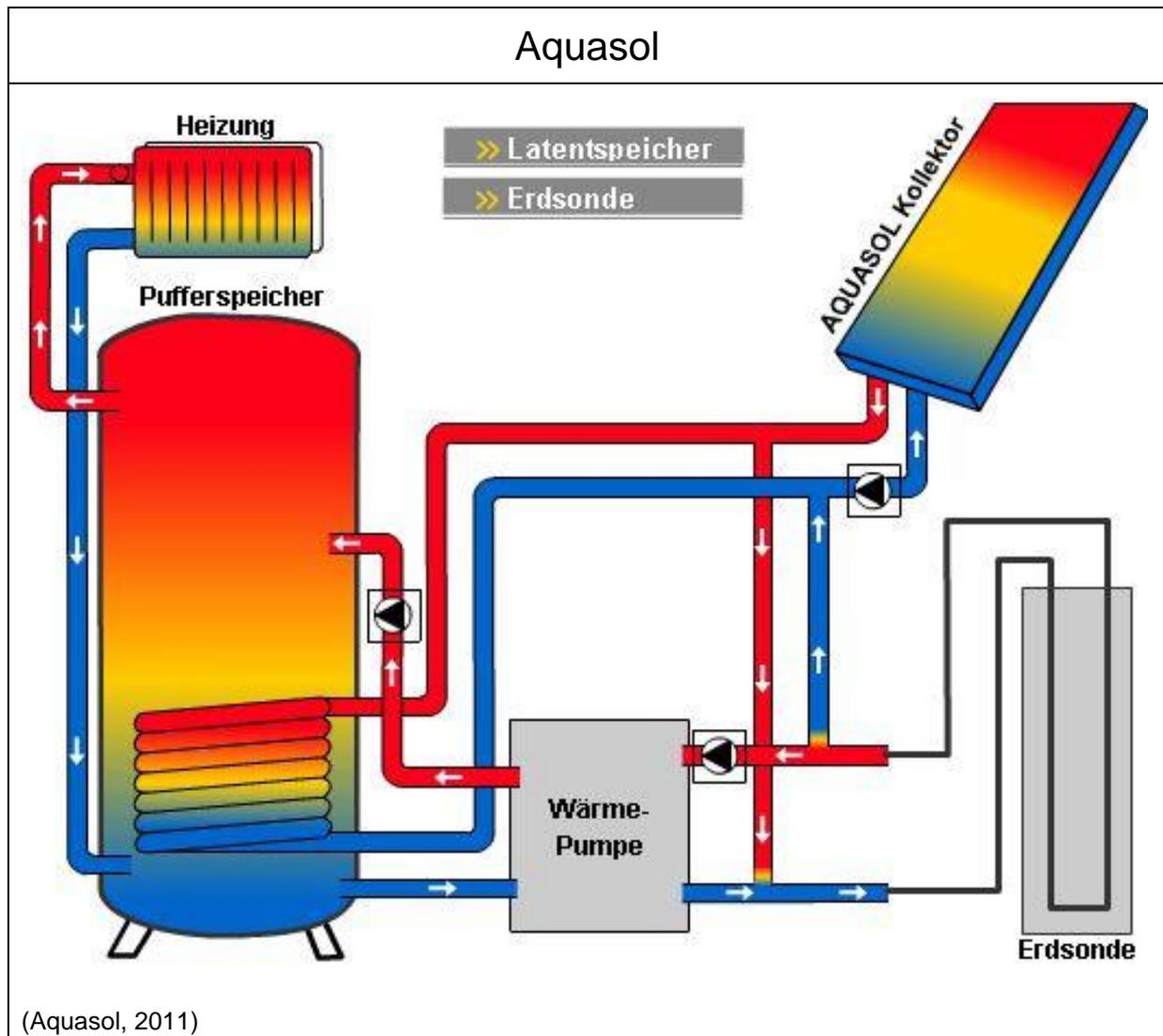
Tabelle 7-4 Energiebilanz des Pufferspeichers BSP-W-SL für die Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“	104
Tabelle 7-5 Jahresenergieverbrauch für Warmwasser und Heizung.....	104
Tabelle 7-6 Berechnungsergebnisse der Wärmepumpe BWS-1-10 in einer Jahressimulation aller untersuchten Anlagenvarianten	105
Tabelle 7-7 monatliche Wärmepumpen-Arbeitszahlen der untersuchten Anlagenvarianten	106
Tabelle 7-8 jährlicher solarer Ertrag der Anlagenvarianten „Wolf“ und „Kombination“	107
Tabelle 7-9 jährlich aufgenommenen Wärmemenge der Wärmepumpe	108
Tabelle 7-10 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.....	109
Tabelle 8-1 Kostenaufstellung der Investition	112
Tabelle 8-2 Vergleich der jährlichen Kosten von den untersuchten Anlagenvarianten	115

Anhang

Anhang 1: Am Markt erhältliche kombinierte Systeme.....	131
Systeme mit aktiver Regeneration	131
Systeme mit großem Pufferspeicher	137
Luft Wärmepumpe mit solarer Unterstützung	140
Systeme mit Eisspeicher/ Latentspeicher	145
Anhang 2: Auslegung der Wärmepumpe und Erdsonde	148

Anhang 1: Am Markt erhältliche kombinierte Systeme

Systeme mit aktiver Regeneration



Vorrangig wird der Pufferspeicher mit der solaren Wärme beladen. In den Sommermonaten wird die überschüssige Wärme in das Erdreich eingebracht. (Aktive Regeneration). In den Wintermonaten kann wegen der geringen Erdreichtemperaturen dieses auch solar beladen werden.

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 10 oder 13

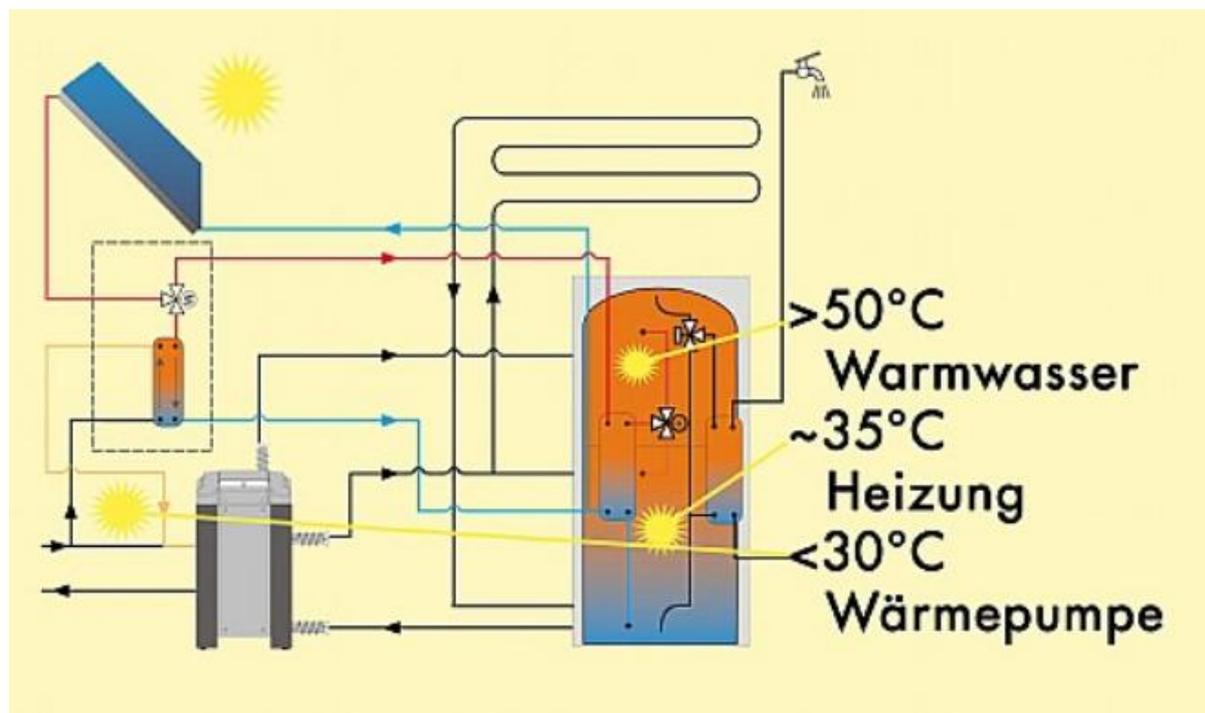
Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 24 oder 32

Speicher: Pufferspeicher

Kondensat: kaum Kondensatanfall, Kollektor trocknet über Öffnungen wieder aus

IDM



(IDM, 2011)

Dieses System arbeitet nach einem 3 Stufen Konzept:

1. Stufe: Temperatur der Solarflüssigkeit (<math>< 50^{\circ}\text{C}</math>) reicht aus um Speicher direkt mit Brauchwasser zu beladen.
2. Stufe: Temperatur der Solarflüssigkeit reicht um Niedertemperatur Heizsystem zu versorgen
3. Stufe: Kollektoren erzeugen überschüssige Energie. Erdsonde oder Kollektor wird damit beladen.

WP: Sole/Wasser; Wasser/Wasser, Luft/Wasser

Leistung [kW]: 3,4 bis 30

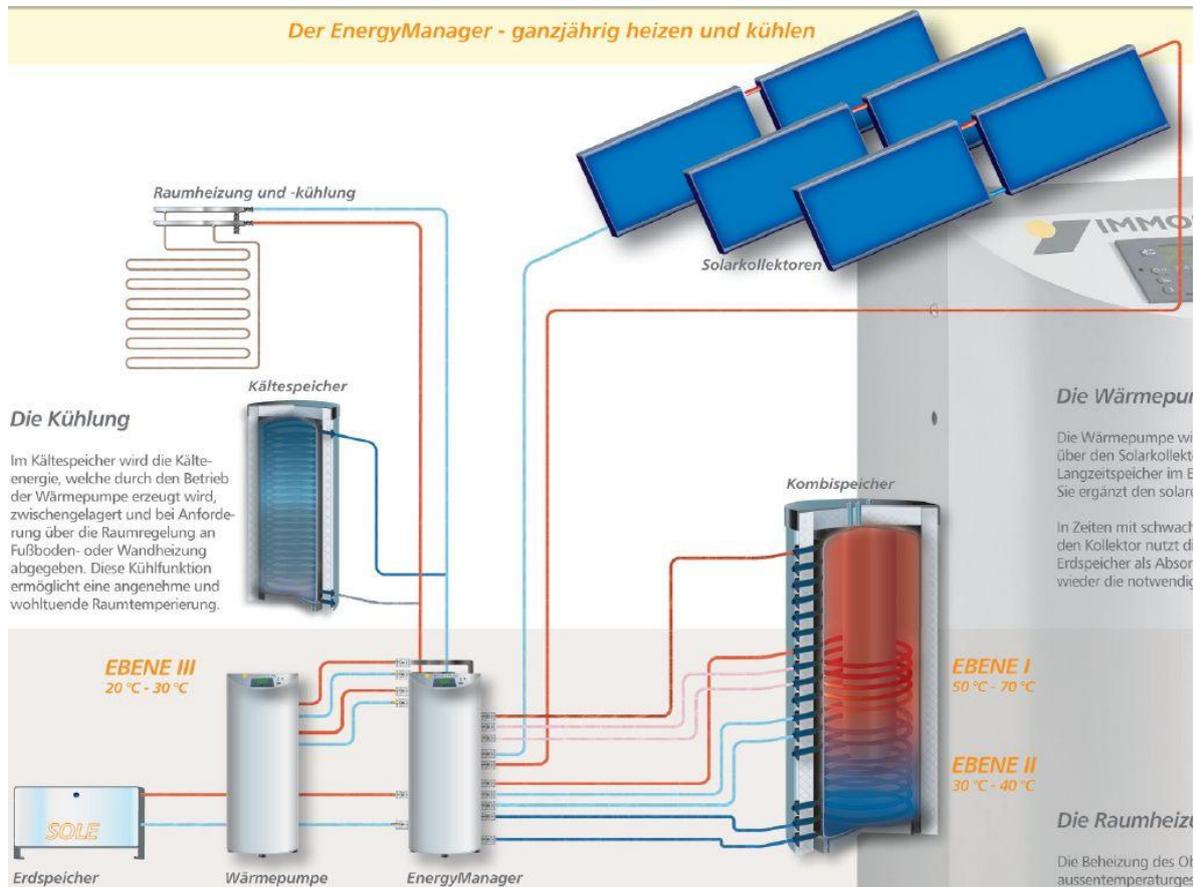
Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m^2]: keine Angabe

Speicher: Pufferspeicher

Kondensat: keine Angabe

Immosolar: Das EnergyManagementSystem (EMS)



(Immosolar, 2011)

Der Solarkollektor belädt vorrangig den Warmwasserbereich des Kombispeichers und nachrangig den Heizungsbereich. Bei solarem Überschuss wird die Wärme verwendet um das Erdreich zu regenerieren. Die Wärmepumpe bezieht die Wärme entweder direkt von den Solarkollektoren oder aus dem Erdreich. Ein zusätzlicher Kältespeicher, der die erzeugte Kälte der Wärmepumpe aufnimmt, kann genutzt werden um bei Bedarf das Gebäude zu kühlen.

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 10

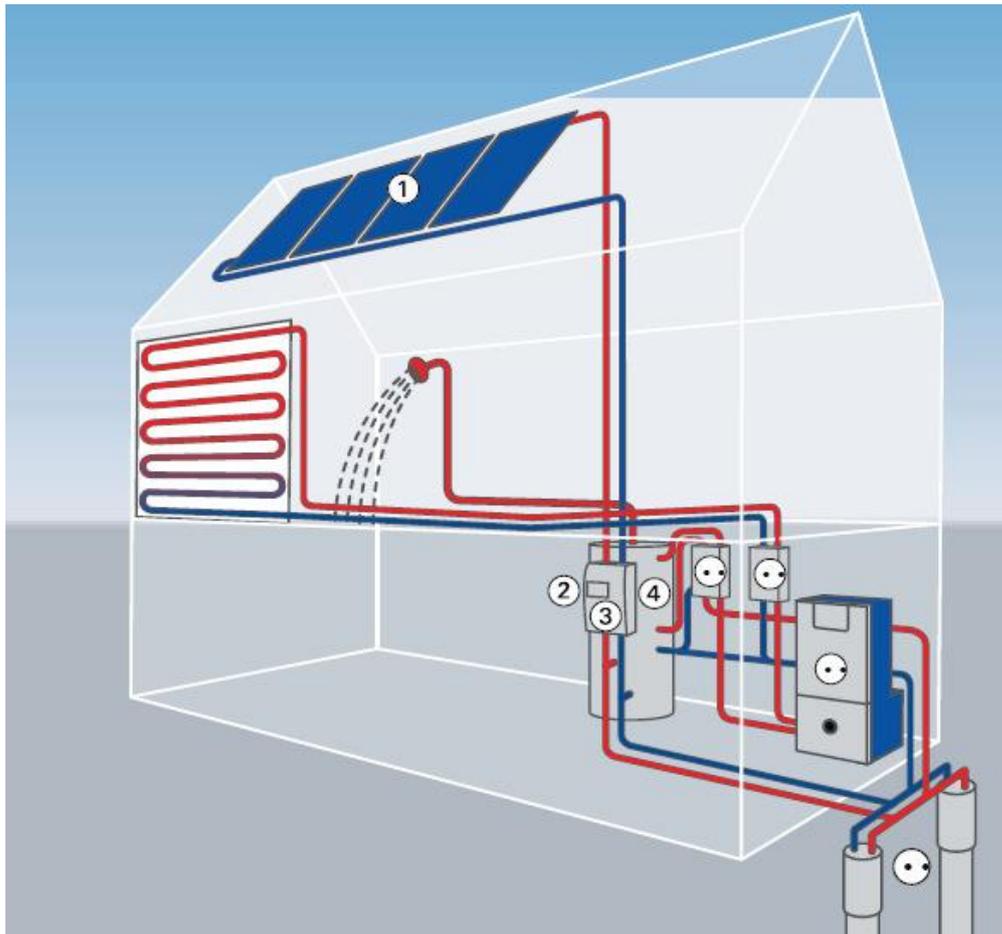
Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 28

Speicher: Kombispeicher

Kondensat: Angefallenes Kondensat kann auch in größeren Mengen über Öffnungen im Kollektor abtrocknen

Schüco: System HPSol



(Schüco, 2011)

Die solare Wärme wird in den Kombispeicher eingebracht um Warmwasser bzw. Heizungswasser zu erwärmen. Bei zu niedrigen Kollektortemperaturen wird das Erdreich regeneriert. Als Quelle für die Wärmepumpe wird das Erdreich verwendet. Der Kollektor hat Vorrichtungen die eine Beschädigung durch anfallendes Kondensat verhindert.

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 5 bis 17

Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 10

Speicher: Kombispeicher

Kondensat: Verwendung eines speziell entwickelten „Tiefemperaturkollektors“, bei dem angefallenes Kondensat ablaufen kann

ROTH Werke: Solargeo



(Roth Werke, 2011)

Die solare Wärme wird vorrangig zur Brauchwasser und Heizungsunterstützung verwendet. Ist die Temperatur des Solarkollektors zu gering um den Kombispeicher zu beladen, wird vorrangig Wärmepumpenquellentemperatur angehoben und danach das Erdreich regeneriert.

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 9,1

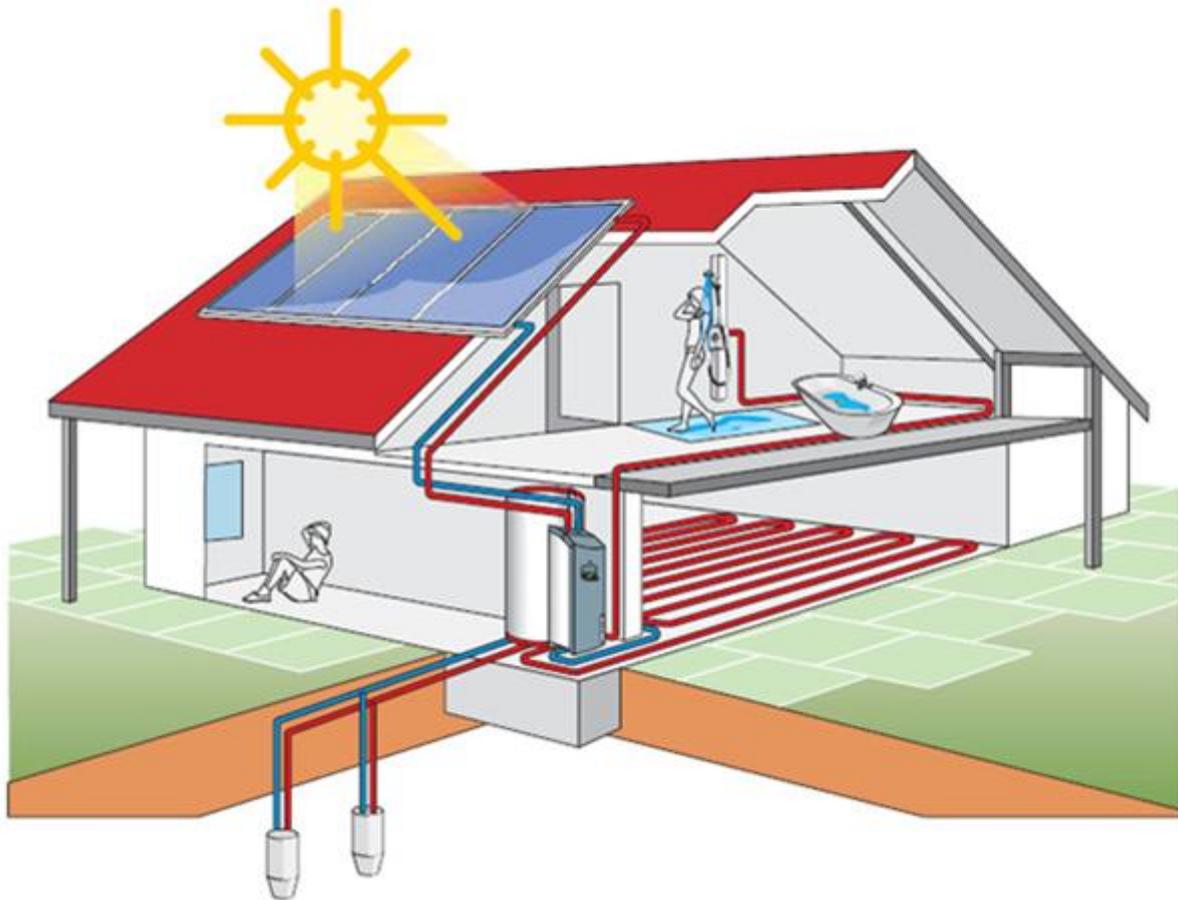
Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 10,08

Speicher: Pufferspeicher

Kondensat: Kollektor aus eigener Produktion bei dem kein Kondensat anfällt

Solvis: SolvisMax



(Solvis, 2011)

Die solare Wärme wird vorrangig zur Brauchwasser und Heizungsunterstützung verwendet. Ist die Temperatur des Solarkollektors zu gering um den Kombispeicher zu beladen, wird das Erdreich aktiv regeneriert, und damit Wärmepumpenquellentemperatur angehoben. Im Bedarfsfall kann die Wärmepumpe den Wärmebedarf alleine abdecken.

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 6

Kollektortyp: Flachkollektor

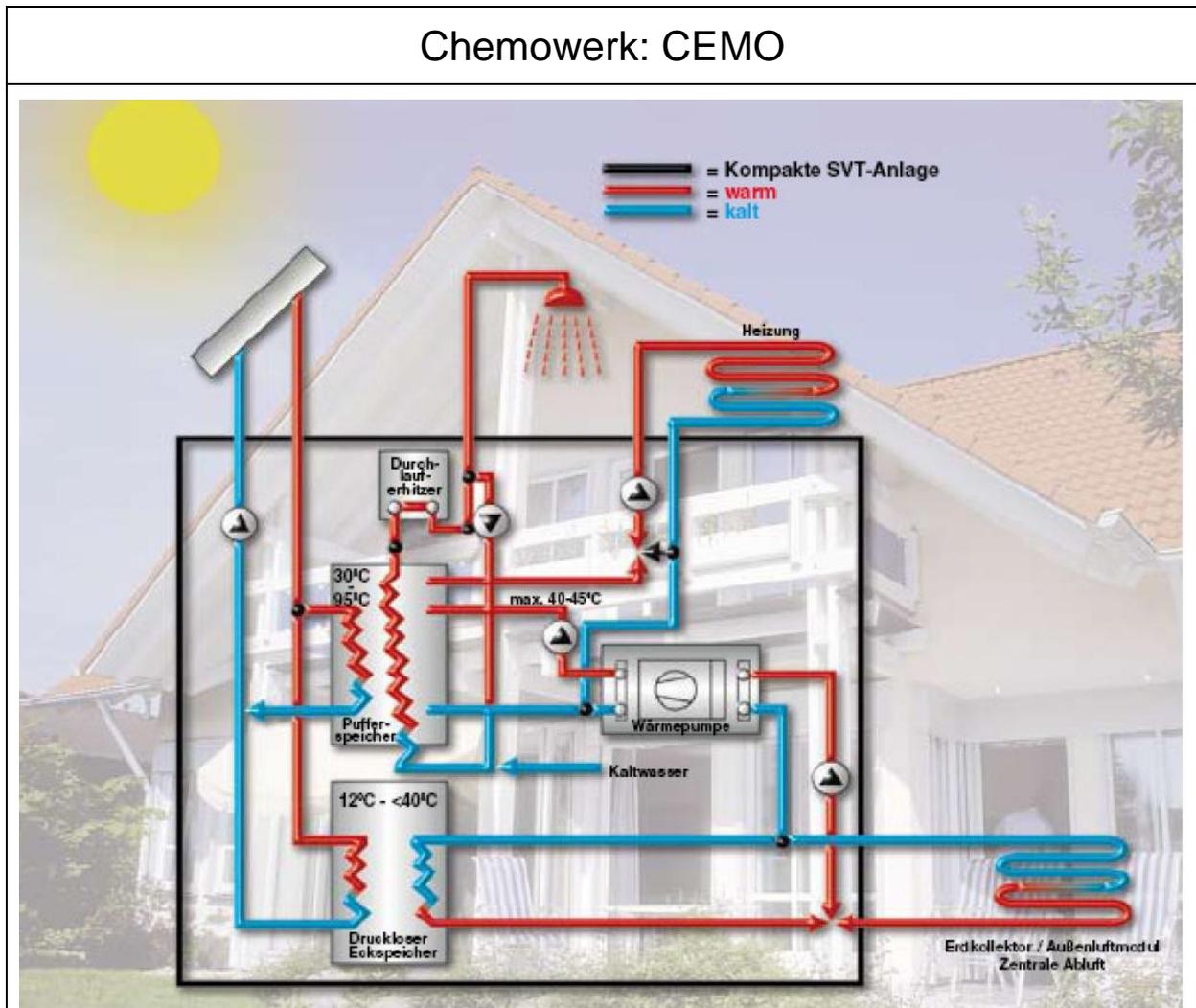
Kollektorfläche [m²]: 12

Speicher: Pufferspeicher 0,65m³ oder 0,75m³

Kondensat: Regelung einer Mindestrücklauftemperatur der Kollektoren soll hohen

Kondensatanfall verhindern

Systeme mit großem Pufferspeicher



(Chemowerk GmbH, 2011)

Die solare Wärme wird vorrangig zur Brauchwasser und Heizungsunterstützung verwendet. Ist die Temperatur des Solarkollektors zu gering um den Kombispeicher zu beladen, wird ein Niedertemperaturspeicher beladen. Die Wärmepumpe hat die Wahl den Niedertemperaturspeicher bzw. das Erdreich als Wärmequelle zu nutzen.

WP: Sole/Wasser; Luft/Wasser

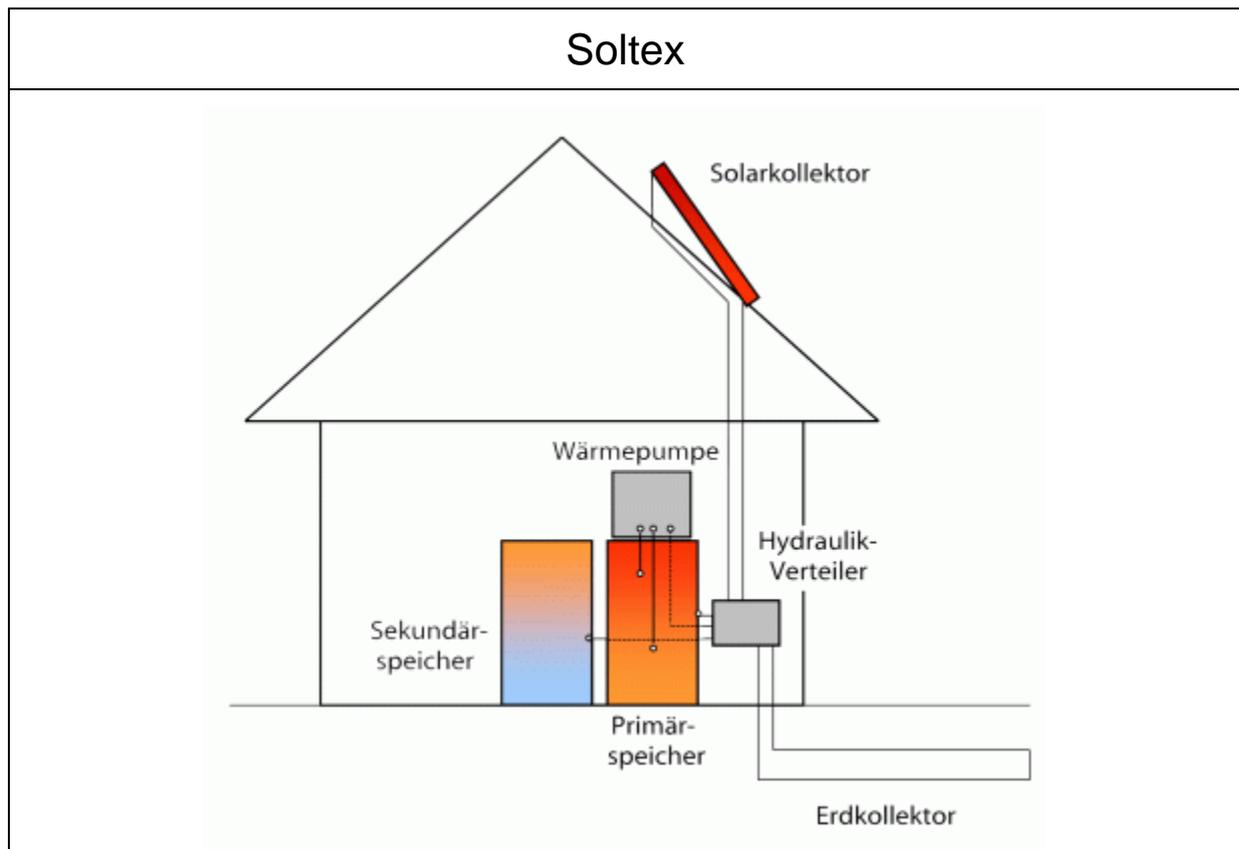
Leistung [kW]: 5,3 oder 7,2

Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 12

Speicher: Pufferspeicher (Hochtemperatur 0,6m³ oder 1 m³)

Kondensat: Mindesttemperatur für den Kollektorrücklauf durch Systemregelung



(Soltex, 2011)

Die solare Wärme wird vorrangig zur Brauchwasser und Heizungsunterstützung verwendet. Ist die Temperatur des Solarkollektors zu gering um den Kombispeicher zu beladen, wird ein Niedertemperaturspeicher beladen. Sinkt die Temperatur im Pufferspeicher unter einen definierten lädt die Wärmepumpe den Pufferspeicher nach. Als Wärmepumpenquelle dient entweder direkt der Solarkollektor oder der solar beladenen Niedertemperaturspeicher. Steht keine solare Wärme zur Verfügung wird das Erdreich als Wärmepumpenquelle verwendet,

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 3,6,10

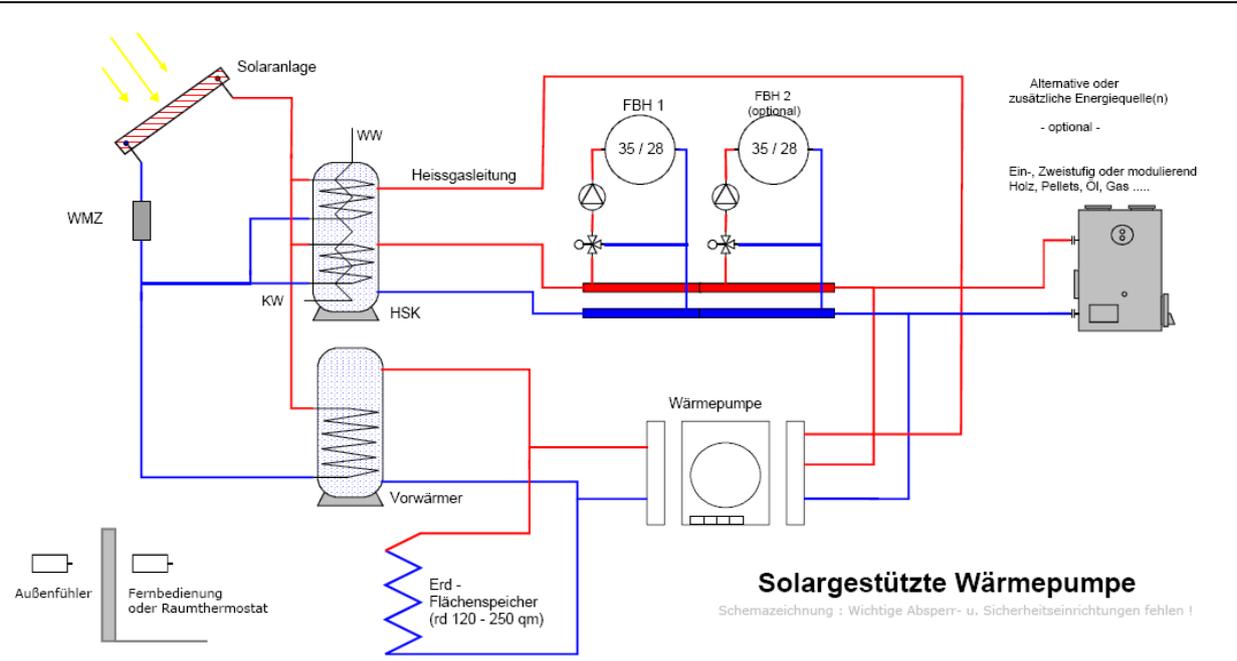
Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 10

Speicher: Pufferspeicher & Niedertemperaturspeicher

Kondensat: Mindestrücklauftemperaturregelung der Kollektoren soll Kondensatbildung verhindern

thermosolar AG : Solargestützte Wärmepumpe

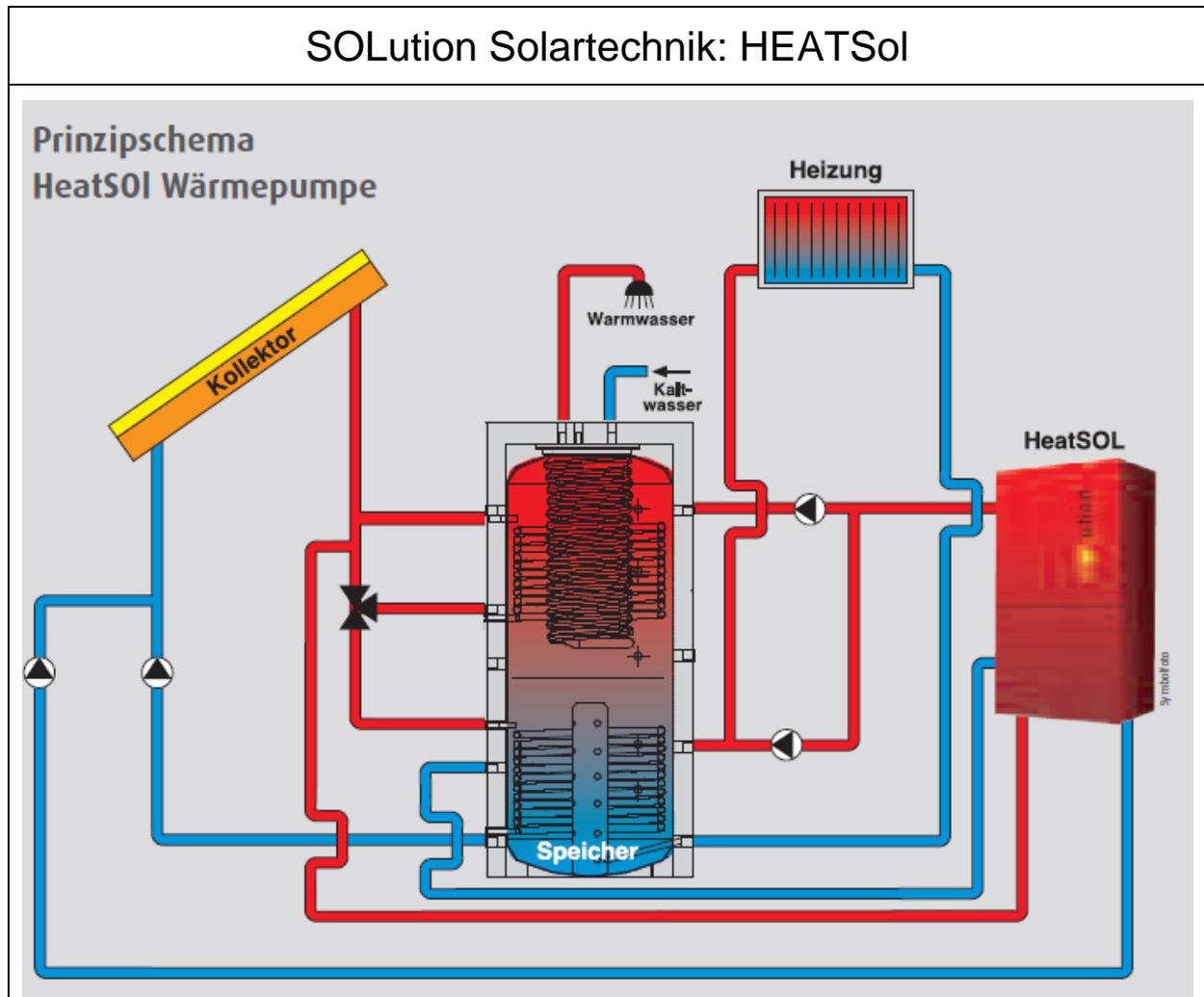


(Thermosolar AG, 2011)

Die Solarkollektoren beladen vorrangig die beiden Pufferspeicher zur Brauchwassererwärmung. Sind diese beladen, regeneriert das Kollektorfeld den Erdspeicher mit der solaren Wärme. Wenn der Wärmebedarf nicht gedeckt werden kann arbeitet die Wärmepumpe entweder mit dem Kollektorfeld oder dem Erdspeicher als Quelle.

WP: Wasser/Wasser
 Leistung [kW]: keine Angabe
 Kollektortyp: Vakuumflachkollektor
 Kollektorfläche [m²]: keine Angabe
 Speicher: 2 Pufferspeicher
 Kondensat: Kein Kondensat, da Vakuumflachkollektoren verwendet werden

Luft Wärmepumpe mit solarer Unterstützung



(SOLution, 2011)

Die solare Wärme wird vorrangig zur Brauchwasser und Heizungsunterstützung verwendet. Reicht die solare Wärme nicht aus belädt die Luftwärmepumpe den Pufferspeicher. Am Luftwärmetauscher dieser Wärmepumpe kann es zu einer Vereisung kommen. Um diesen zu verhindern ist der Solarkreislauf mit der Wärmepumpe verbunden. So werden auch niedrige Kollektortemperaturen genutzt.

WP: Luft/Wasser

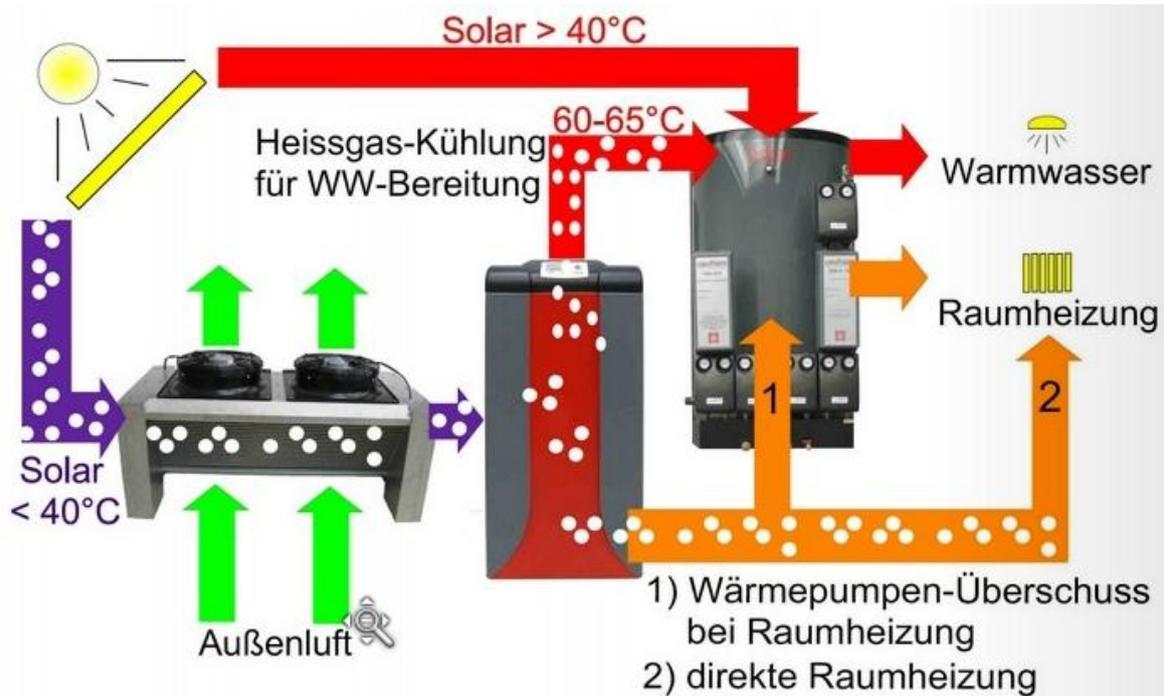
Leistung [kW]: bis 15

Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 16 - 30

Speicher: Pufferspeicher

Kondensat: Der Kondensatanfall ist laut Hersteller nicht höher als bei normalem Kollektorbetrieb. Es ist zusätzlich Mindesttemperaturregelung vorhanden

ratiotherm: OSKAR-SOL-MAX²

(Ratiotherm, 2011)

Kollektortemperaturen über 40 °C werden genutzt um den Schichtspeicher direkt zu beladen.
Kollektortemperaturen unter 40°C werden zur Vorwärmung der von der Wärmepumpe angesaugten Umgebungsluft verwendet.

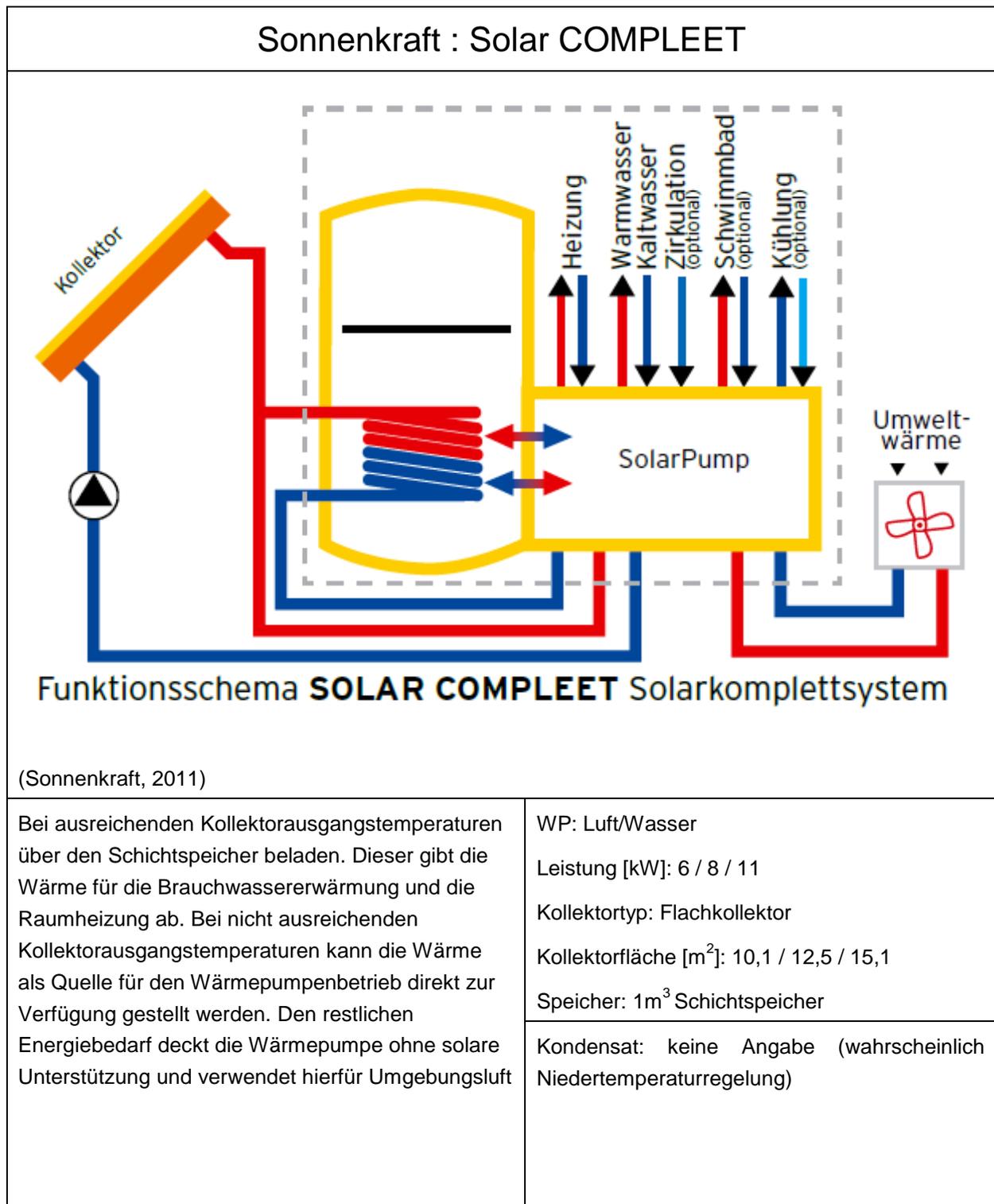
WP: Luft/Wasser

Leistung [kW]: 8 – 8,5 / 11,8 – 13,2 / 16,2 – 18,2

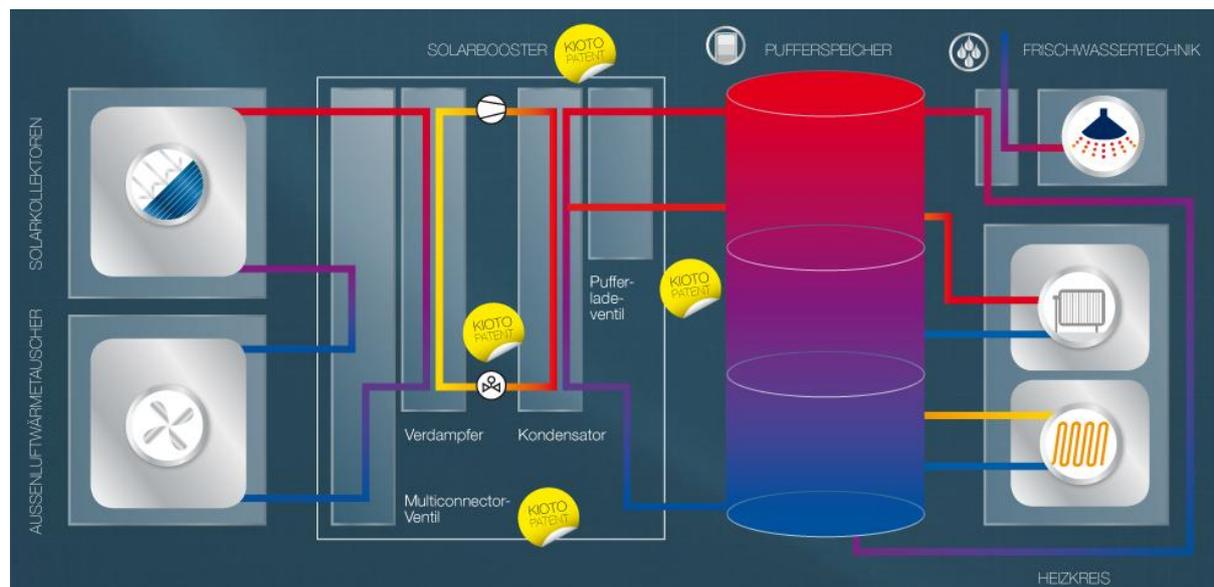
Kollektortyp: Flachkollektor

Kollektorfläche [m²]: 12 / 16 / 20Speicher: Schichtspeicher (0,75 m³ / 1m³ / 1,3 m³)

Kondensat: Kondensat wird über Öffnungen in Kollektorboden geleitet



KIOTO : Sonnenheizung



(Kioto, 2011)

Dieses System arbeitet mit einer intelligenten Regelungseinheit, welches in der Lage ist aus z.B. Nutzerverhalten und Wetter zu lernen, und die Regelung darauf abzustimmen. Die Solarkollektoren werden zusätzlich auch als Wärmetauscher für die Wärmepumpe verwendet. Als Backup wird ein elektrischer Heizstab verwendet.

WP: Sole/Wasser

Leistung [kW]: 6

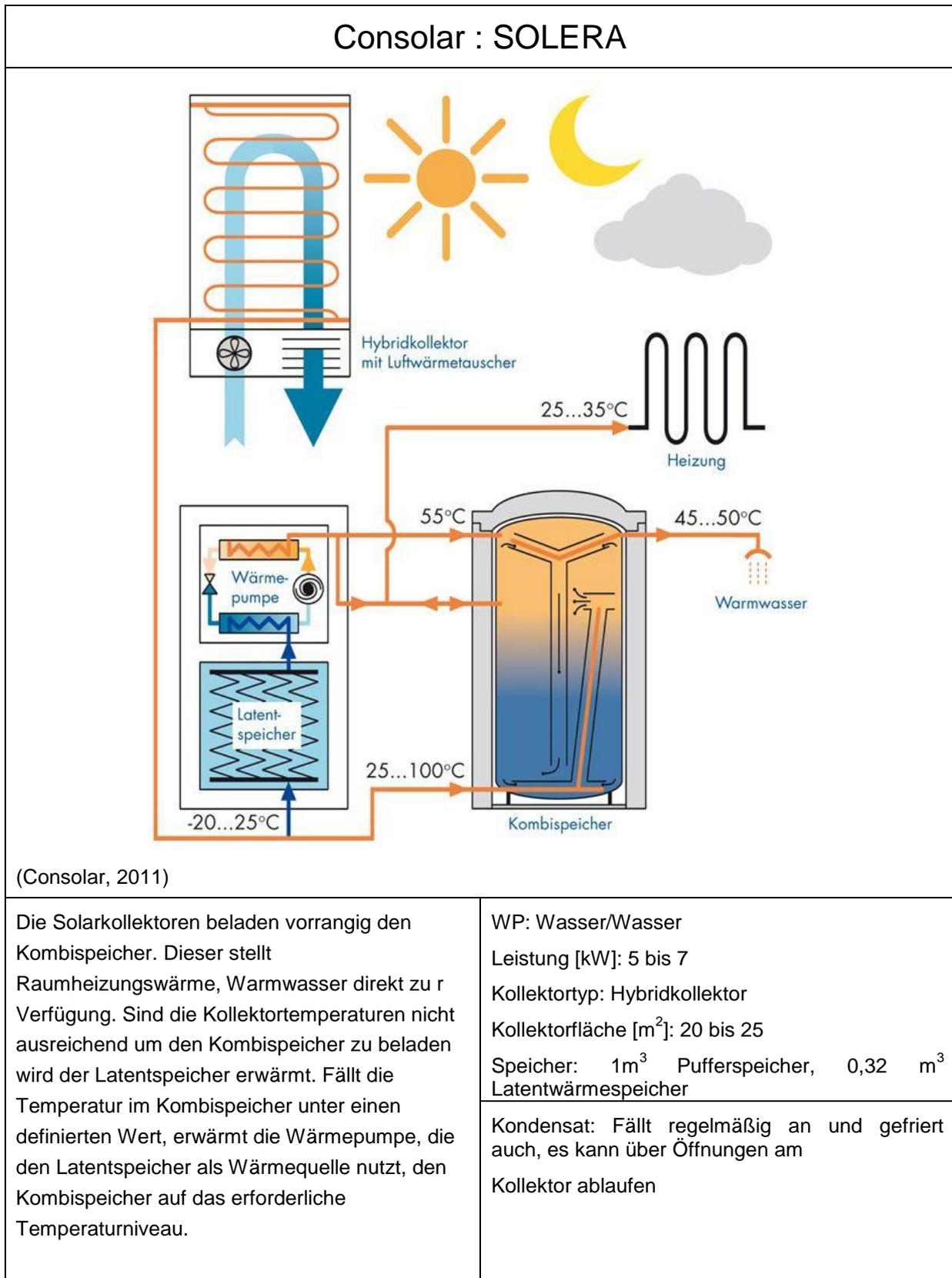
Kollektortyp: Flachkollektor

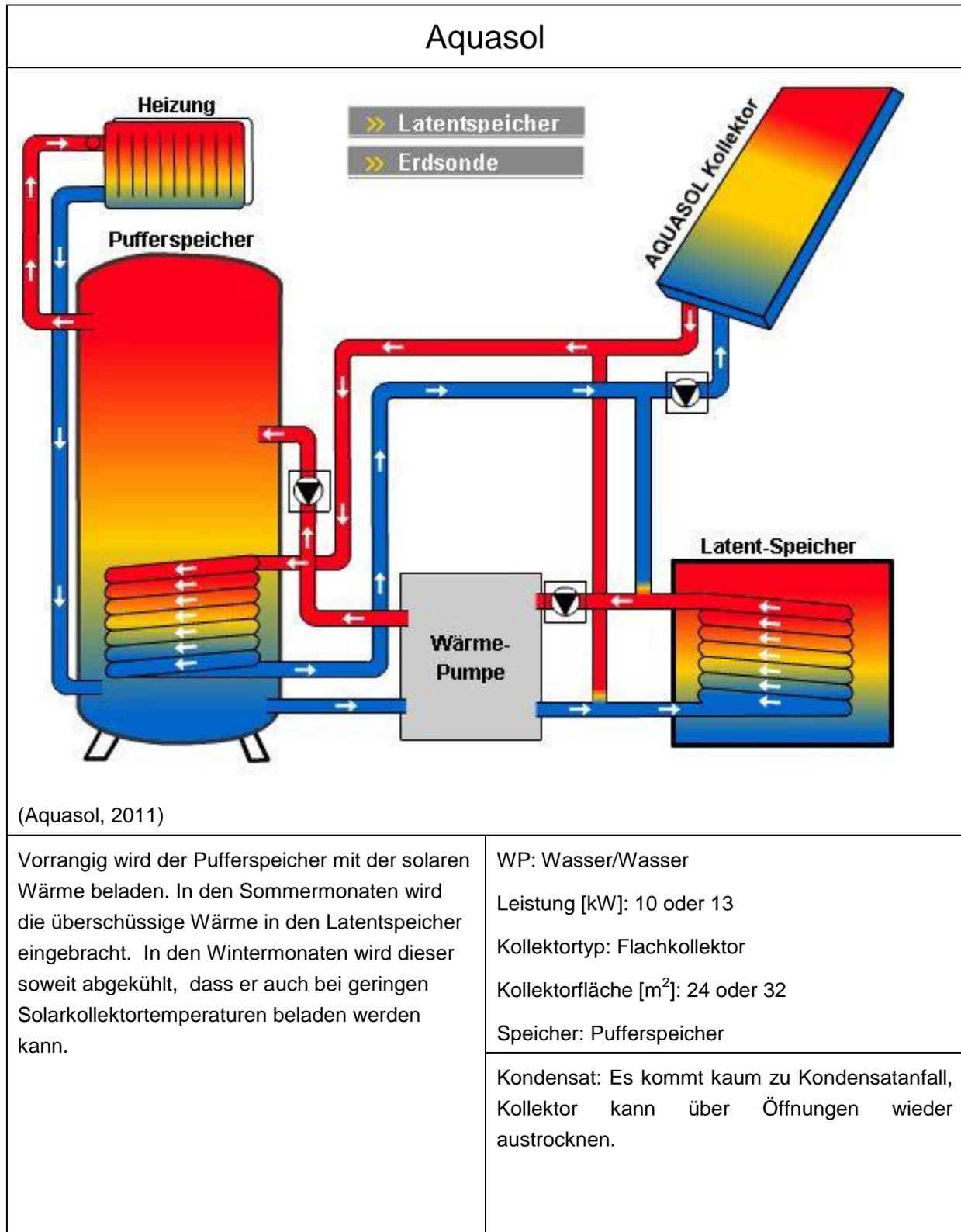
Kollektorfläche [m²]: 15

Speicher: 1m³ Schichtspeicher

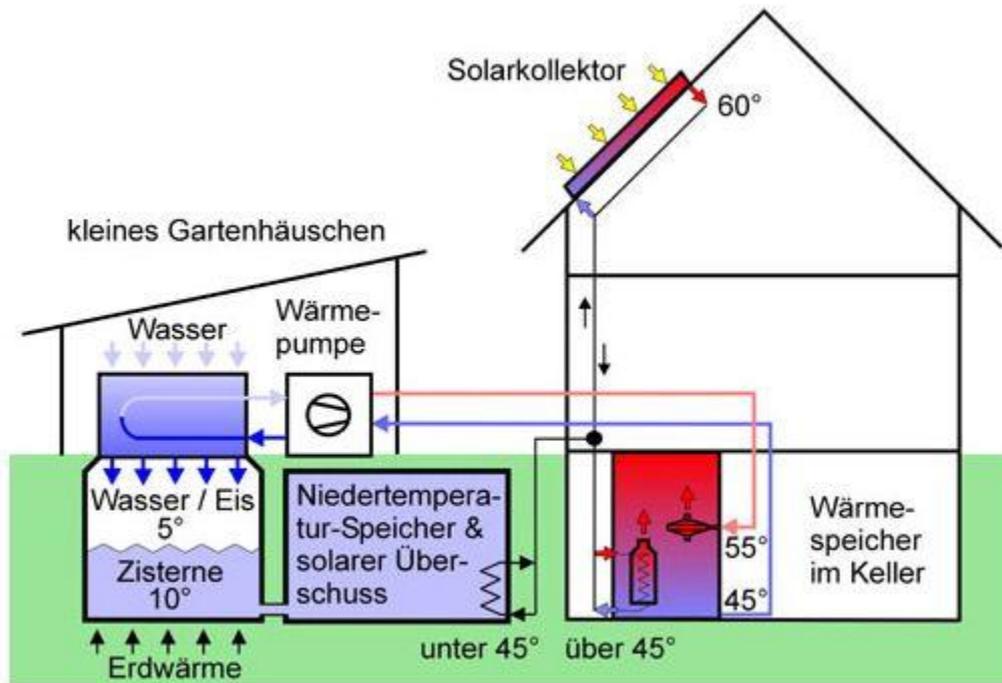
Kondensat: keine Angabe (wahrscheinlich Niedertemperaturregelung)

Systeme mit Eisspeicher/ Latentspeicher





terra sunenergy GmbH: SuperSolar



(Müller, et al., 2008)

Die Wärmepumpe nutzt als Quelle Wasser aus dem Eisspeicher / Zisterne. Diesem wird bis hin zur vollständigen Vereisung Wärme entzogen, während es über Edelstahlplatten rieselt. Das Eis fällt schließlich von den Platten ab und wird im Eisspeicher durch Energiezufuhr wieder aufgetaut. Das Kollektorfeld bedient vorrangig den Heißwasserspeicher. Fällt die Kollektorvorlauftemperatur witterungsbedingt so weit ab, dass eine weitere Wärmeeinbringung in den Heißwasserspeicher nicht mehr möglich ist, wird der Niedertemperaturspeicher beladen. Dieser wird auch beladen, wenn der Heißwasserspeicher voll beladen ist. Der Heißwasserspeicher hat eine Reichweite von maximal 5 Tagen. Das System ist im Minimalfall so ausgelegt, dass eine solare Deckungsrate von mindestens 50 % erreicht wird.

WP: Wasser/Wasser

Leistung [kW]: 10 oder 13

Kollektortyp: Flach oder Vakuumröhrenkollektor

Kollektorfläche [m²]: 24 oder 32

Speicher: Heißwasserspeicher im Keller (4, 5 oder 6 m³); Niedertemperaturspeicher; Eisspeicher / Zisterne

Kondensat: Bei Vakuumröhrenkollektoren tritt das Problem nicht auf, bei Flachkollektoren

keine speziellen Vorrichtungen gegen Kondensat

Anhang 2: Auslegung der Wärmepumpe und Erdsonde

Berechnung nach Planungsunterlagen für Wolf Hocheffizienzpumpen (Wolf GmbH, 2011)

Auslegung der Wärmepumpe:

$$q_G = 50 \text{ W/m}^2 \quad \dots \text{ spez. Heizleistung nach EN 12831; Neubau nach EnEV 2009}$$

$$A_{\text{Haus}} = 150 \text{ m}^2 \quad \dots \text{ beheizte Wohnfläche}$$

$$Q_G = q_G * A_{\text{Haus}} \quad \dots \text{ Heizleistungsbedarf}$$

$$Q_G = 7500 \text{ W}$$

$$q_{\text{WW}} = 0,25 \text{ kW} \quad \dots \text{ spez. Leistungsbedarf für Warmwasserbereitung}$$

$$n_{\text{Personen}} = 4 \quad \dots \text{ Anzahl der im Haushalt lebenden Personen}$$

$$Q_{\text{WW}} = q_{\text{WW}} * n_{\text{Personen}} \quad \dots \text{ Leistungsbedarf für Warmwasserbereitung}$$

$$Q_{\text{WW}} = 1000 \text{ W}$$

$$Q_S = 0 \quad \dots \text{ Leistungsbedarf für Sondernutzung}$$

$$Z = 1 \quad \dots \text{ Sperrzeitenfaktor}$$

$$Q_{\text{WP}} = (Q_G + Q_{\text{WW}} + Q_S) * Z \quad \dots \text{ Gesamter Leistungsbedarf}$$

$$Q_{\text{WP}} = 8500 \text{ W}$$

Um eine Wärmeleistung von 8500 W bereitstellen zu können ist die Wärmepumpe BWS-1-10 gewählt worden.

Auslegung der Erdsonde:

$$Q_{\text{WP_Heiz}} = 10,8 \text{ kW} \quad \dots \text{ Wärmeleistung im der BWS-1-10 im Betriebspunkt B0/W35:}$$

$$Q_{\text{WP_elektr}} = 2,4 \text{ kW} \quad \dots \text{ elektrische Leistungsaufnahmen der BWS-1-10 im Betriebspunkt B0/W35}$$

$$Q_0 = Q_{\text{WP_Heiz}} - Q_{\text{WP_elektr}} \quad \dots \text{ Wärmeleistung die von der Sonde zur Verfügung gestellt werden muss}$$

$$Q_0 = 8,4 \text{ kW}$$

$$q_e = 65 \text{ W/m} \quad \text{nach VDI 4640; Erdschicht besteht aus Sandstein; 2400 h/a}$$

$$L = \frac{Q_0}{q_e} \quad \dots \text{ Gesamtlänge der Erdsonde}$$

$$L = 130 \text{ m}$$

die Erdsonde muss eine Gesamtlänge von 130 m aufweisen um die Wärmepumpe versorgen zu können